

2013

Bauhaus-Universität Weimar

Michael Göbel

FASER-KUNSTSTOFF-METALL-GLAS-HYBRIDSYSTEME UND DEREN EINSATZ IN TRAGENDEN KONSTRUKTIONEN

Beitrag zur Entwicklung hocheffizienter struktureller Hybridsysteme unter Anwendung moderner Faserwerkstoffe, Kunststoffe und Klebstoffe.

**Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Professur Stahlbau**

**FASER-KUNSTSTOFF-METALL-HYBRIDSYSTEME
UND DEREN EINSATZ IN TRAGENDEN KONSTRUKTIONEN**

**Beitrag zur Entwicklung hocheffizienter struktureller Hybridsysteme
unter Anwendung moderner Faserwerkstoffe, Kunststoffe und Klebstoffe**

**Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar
zur Erlangung des
akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte**

DISSERTATION

von

**Michael Göbel
aus Stendal**

Tag der Verteidigung: 12.07.2013

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Werner

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ruth

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak

Weimar 2013

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Wesentlichen während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Stahlbau der Bauhaus-Universität Weimar. Beenden durfte ich diese Arbeit während meiner Tätigkeit in der Ingenieurgesellschaft GAM mbH & Co. KG, wofür ich recht herzlich danke.

Meinem Mentor und Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Ing. habil. Frank Werner, danke ich sehr herzlich für seine wohlwollende Förderung, die bereitwillige Unterstützung, das mir entgegengebrachte Vertrauen in meine Person sowie die vielen anregenden Diskussionen während der Betreuung dieser Arbeit.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. Ing. Jürgen Ruth von der Professur Massivbau II der Bauhaus-Universität Weimar sowie Herrn Prof. Dr. Ing. habil. Hartmut Pasternak vom Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus für die Betreuung und Funktion als Gutachter.

Für die sehr gute Zusammenarbeit danke ich den Mitarbeitern der RÖDER HTS HÖCKER GmbH, allen voran den Geschäftsführern Herrn Heinz Röder und Herrn Markus Wiegand, die das dieser Arbeit zugrunde liegende sehr aufwendige Versuchsprogramm gefördert haben. Frau Edith Zimmermann von iKTZ – Innovative Klebtechnik Zimmermann sei für die vielfältigen Denkanstöße zur Herstellung dauerhafter Klebverbindungen gedankt, die einen wesentlichen Anteil dieser Arbeit überhaupt möglich machten.

Den Mitarbeitern der Versuchstechnischen Einrichtung an der Bauhaus-Universität Weimar, allen voran Herrn Herbert Pfirschke und Herrn Dieter Vogler danke ich für die Betreuung und Durchführung umfangreicher und oft auch sehr komplexer Versuche.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Professur Stahlbau für die vielfältige Unterstützung und Hilfe. Besonderer Dank gilt dabei Frau Yvonne Wagner, Herrn Dr. Ing. Lutz Scheider, Herrn Dr. Ing. Karl-Heinz Müller, Herrn Prof. Dr. Ing. Jörg Hildebrand, Herrn Dipl.-Ing. Holm Friedrich, Herrn Dipl.-Ing. Björn Wittor und Herrn Dipl.-Ing. Frank Scheiber, die neben ihrer fachlichen Unterstützung auch stets menschlich eine große Hilfe darstellten.

Dankend sei auch meine Frau, Kristina Göbel erwähnt, die mich mit unseren beiden Kindern über die doch recht lange Bearbeitungszeit immer unterstützte und mir den notwendigen Rückhalt für den erfolgreichen Abschluss der vorliegenden Arbeit gab.

Weimar, Juli 2013

Michael Göbel

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	1
FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN	7
ABKÜRZUNGEN	7
GRIECHISCHE BUCHSTABEN	8
BEGRIFFE UND DEFINITIONEN	9
1 EINLEITUNG	1
1.1 MOTIVATION	1
1.2 ZIELSTELLUNG	2
1.3 VORGEHENSWEISE	3
1.4 ABGRENZUNG	4
1.5 GLIEDERUNG DER ARBEIT	5
2 STRUKTURELLE HYBRIDSYSTEME IM BAUWESEN	7
2.1 EINFÜHRUNG	7
2.1.1 GRUNDLAGEN	7
2.1.2 GESCHICHTE UND KATALOGISIERUNG DER HYBRIDSYSTEME	8
2.1.3 GRUNDLEGENDE ANFORDERUNGEN	13
2.2 AUSGEWÄHLTE HYBRIDSYSTEME	15
2.2.1 GRUNDLAGEN	15
2.2.2 WERKSTOFFAUSWAHL	17
2.2.3 WERKSTOFFKOMBINATION	23
2.2.4 ENTWICKLUNGSSTAND	27
2.3 SYSTEMSPEZIFISCHE ANFORDERUNGEN	31
2.3.1 VERBUNDBETRACHTUNG	31
2.3.2 TEMPERATURDEHNUNGEN / BIMETALLEFFEKT	33
2.3.3 ALTERUNG / DAUERBEANSPRUCHUNG	34
2.3.4 MEDIENBESTÄNDIGKEIT	35
2.3.5 HERSTELLUNGSTECHNOLOGIEN	36
2.4 SYNTHESEMETHODEN DER NUMERISCHEN UND EXPERIMENTELLEN ANALYSE	37
2.4.1 EINLEITUNG	37
2.4.2 ANALYTISCHE BETRACHTUNGEN	38
2.4.3 NUMERISCHE BETRACHTUNG MITTELS FEM	38
2.4.4 EXPERIMENTELLE BETRACHTUNGEN	40
2.5 WEITERE ENTWICKLUNG	41
2.5.1 ENTWICKLUNGSSCHWERPUNKTE DIESER ARBEIT	41
2.5.2 BEMESSUNG VON KLEBVERBINDUNGEN	41

3	KLEBSTOFF-FASER-VERBUNDWERKSTOFFE	43
3.1	GRUNDLAGEN	43
3.1.1	EINLEITUNG	43
3.1.2	INGENIEURMÄßIGE BETRACHTUNG	44
3.1.3	AUSGANGSWERKSTOFFE	46
3.1.4	VERBUNDBETRACHTUNGEN	48
3.1.5	OPTIMIERUNG SYSTEMRELEVANTER MATERIALPARAMETER	62
3.1.6	METALLFASER-VERSTÄRKTE KLEBSTOFFE	64
3.1.7	GLASFASER-VERSTÄRKTE KLEBSTOFFE	65
3.2	UNTERSUCHUNGEN AUSGEWÄHLTER KOHLENSTOFFFASER-VERSTÄRKTER KfV	66
3.2.1	SYSTEMBESCHREIBUNG KOHLEFASER-VERSTÄRKTER KLEBSTOFFE	67
3.2.2	MECHANISCHE GRUNDEIGENSCHAFTEN	73
3.2.3	ADHÄSIONSBETRACHTUNGEN	80
3.2.4	TEMPERATURDEHNUNGEN	84
3.2.5	AUSHÄRTVORGANG	85
3.3	HERSTELLUNGSASPEKTE UND ANWENDUNG	87
3.3.1	GRUNDLAGEN	88
3.3.2	ENTWICKLUNG EINER APPLIKATIONSEINHEIT	89
3.3.3	PARAMETER DER ANWENDUNG	91
3.4	BEMESSUNGSKONZEPT	91
3.4.1	SICHERHEITSBETRACHTUNGEN	91
3.4.2	BEMESSUNG	92
4	ALU-CFK-HYBRIDELEMENTE	94
4.1	GRUNDLAGEN	94
4.1.1	EINLEITUNG	94
4.1.2	INGENIEURMÄßIGE BETRACHTUNG	97
4.1.3	AUSGANGSWERKSTOFFE	100
4.1.4	VERBUNDBETRACHTUNGEN	116
4.1.5	OPTIMIERUNG SYSTEMRELEVANTER MATERIALPARAMETER	133
4.2	UNTERSUCHUNGEN AUSGEWÄHLTER ALU-CFK-HYBRIDELEMENTE	134
4.2.1	STATISCHE KURZZEITEINWIRKUNG	135
4.2.2	STATISCHE UND DYNAMISCHE LANGZEITBEANSPRUCHUNG	143
4.3	HERSTELLUNGSASPEKTE UND ANWENDUNG	144
4.3.1	GRUNDLAGEN	144
4.3.2	INDUSTRIELLE PRODUKTION VON ALU-CFK-HYBRIDELEMENTEN	144
4.3.3	PARAMETER DER ANWENDUNG	144
4.4	BEMESSUNGSKONZEPT	145
4.4.1	SICHERHEITSBETRACHTUNGEN	145
4.4.2	ZUVERLÄSSIGKEITSBETRACHTUNG MITTELS STOCHASTISCHER METHODEN	146

5	<u>GLAS-KUNSTSTOFF-HYBRIDELEMENTE</u>	147
5.1	GRUNDLAGEN	147
5.1.1	EINLEITUNG	147
5.1.2	INGENIEURMÄßIGE BETRACHTUNG	148
5.1.3	AUSGANGSWERKSTOFFE	150
5.1.4	VERBUNDBETRACHTUNG	154
5.2	UNTERSUCHUNG AUSGEWÄHLTER GLAS-KUNSTSTOFF-HYBRIDELEMENTE	155
5.2.1	DOPPELTSYMMETRISCHE QUERSCHNITTSFORMEN	155
5.2.2	LÖSBARE UND UNLÖSBARE VERBINDUNGSELEMENTE	159
5.2.3	EXPERIMENTALBAUTEN UNTER LANGZEITERPROBUNG	162
5.3	HERSTELLUNGSASPEKTE UND ANWENDUNG	165
5.3.1	RANDBEDINGUNGEN DER KLEBVERBINDUNG	165
5.3.2	PARAMETER DER ANWENDUNG	166
5.4	BEMESSUNGSKONZEPT	167
5.4.1	SICHERHEITSBETRACHTUNGEN	168
5.4.2	BEMESSUNG	168
6	<u>ZUSAMMENFASSUNG / AUSBLICK</u>	171
6.1	BEWERTUNG DER FORSCHUNGSERGEBNISSE	172
6.2	ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN	174
7	<u>ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNISSE</u>	175
7.1	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	175
7.2	TABELLENVERZEICHNIS	177
8	<u>LITERATUR</u>	178
8.1	ZITIERTE LITERATUR	178
8.2	EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN	192

Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzungen

A	Fläche
a	Breite
Alu	Aluminium
B	Abstand zwischen 2 Punkten
b	Breite
d	Durchmesser, Dicke, Fraktilenfaktor für Bemessungswerte
DMS	Dehnungsmessstreifen
dx	Ableitung nach x
E	Elastizitätsmodul, Einwirkungsgröße
$\dot{E}(t)$	zeitabhängiger E- Modul
E°	Standardpotenzial
EP	Epoxidharzklebstoff
f	Frequenz
FEM	Finite-Elemente-Methode
f_h	relative Häufigkeitsdichte
f_y	Streckgrenze
f_{u+}	Zugfestigkeit
f_{u-}	Druckfestigkeit
G	Schubmodul
g	Erdbeschleunigung
h	Höhe
I_y, I_z	Trägheitsmoment
K	Kompressions- bzw. Bulkmodul
k	Fraktilenfaktor für charakteristische Werte
L	Länge
L_R	Reißlänge einer Faser
M	Moment, massenanteiliger Fasergehalt
N	Normalkraft
P	Punktlast, Leistung
p	Linienlast

PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PMMA	Polymethylmethacrylat
PU	Polyurethanklebstoff
R	Widerstandsgröße
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
R_m	Zugfestigkeit
R_{min}	minimaler Biegeradius einer Faser
$R_{p0,02}$	0,2 % Dehngrenze
s	Schätzwert für die Standardabweichung σ
t	Zeit, Materialdicke
T	Temperatur
U	Umfang
V	Querkraft, Volumen
v	Geschwindigkeit
V_s	Schrumpfmaß
W	Arbeit
W_y, W_z	Widerstandsmoment
x	Achsenbezeichnung
X_d	Bemessungswert
y	Achsenbezeichnung
z	Achsenbezeichnung
ZFM	Momentenzustandsdiagramm
ZFV	Querkraftzustandsdiagramm

griechische Buchstaben

α	Winkelangabe
α_T	Temperaturdehnungskoeffizient
β	Winkelangabe
γ	Schubwinkel, Sicherheitsbeiwert
Δ	Delta, relative Änderung
ε	Dehnung
$\dot{\varepsilon}(t)$	zeitabhängige Dehnung
λ	Wärmeleitfähigkeit

η	dynamische Viskosität, Zähigkeit,
μ	Querdehnzahl, Mittelwert
ρ	Dichte, Luftfeuchtigkeit
σ	Normalspannung, Axialspannung, Standardabweichung
Σ	Summe
ϑ	Temperatur in [°C]
τ	Schubspannung

Begriffe und Definitionen

Im Rahmen dieser Arbeit werden unterschiedliche Begriffe verwendet, die Systemzusammenhänge oder mechanische Vorgänge beschreiben. Dazu gehören:

- **Adhäsionskraft:** von einer Klebverbindung maximal übertragbare Adhäsionskraft, die bezogen auf eine Einheitsfläche wirkende Normalkraft notwendig ist, um den Klebfilm vom Substrat zu trennen (Brockmann, et al., 2005; Habenicht, 2009),
- **Adhäsivversagen:** Versagensform, bei der ein Bruch in der Adhäsionsfuge zwischen unterschiedlichen Werkstoffen erfolgt (Schürmann, 2007),
- **CFK:** Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff, bestehend aus Kohlenstofffasern, die meist in mehreren Lagen als Verstärkung in eine Kunststoffmatrix eingebettet werden (Bräutigam, et al., 2011),
- **Effizienz:** im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzter Aufwand, mit dem ein bestimmtes Ziel zu erreichen ist (Deutsches Institut für Normung, 1999),
- **Faser-Matrix-System:** Verbundsystem aus Faserwerkstoff und einer Kunststoffmatrix (Moser, 1992),
- **Gebrauchstauglichkeit:**
 - Ausmaß, in dem ein Produkt in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen (Deutsches Institut für Normung, 1999),
 - Fähigkeit eines Tragwerks und seiner Bauteile, die Funktionstüchtigkeit und das Aussehen des Bauwerks zu gewährleisten (Pfyl, 2003),
- **GFK:** Glasfaserverstärkter Kunststoff, bestehend aus Glasfasern, die meist in mehreren Lagen als Verstärkung in eine Kunststoffmatrix eingebettet werden (Bräutigam, et al., 2011),
- **Größeneffekt:** statistischer Einfluss, der Auswirkungen von Fehlstellen oder Beschädigungen auf Festigkeitseigenschaften beschreibt (Schürmann, 2007),
- **Halbzeug:** vorgefertigtes Rohmaterial, z. B. Rohre, Bleche oder Stangen (Rauh, 2009),
- **Hybrid:** aus dem griechischen *Hybrida*; Mischling, von zweierlei Herkunft, etwas Gebündeltes, Gemischtes oder Gekreuztes (Seiffert, 2008),
- **Hybridsystem:** System, das mindestens zwei unterschiedliche Eigenschaften in sich vereint (Flemming, et al., 2003), Hybridsysteme werden in dieser Arbeit als strukturell tragfähige Verbundsysteme verstanden, die aus unterschiedlichen Elementen bestehen, welche strukturell miteinander gekoppelt sind.

- **Hybridwerkstoff:** aus verschiedenartigen Werkstoffen bestehender Verbundwerkstoff, der seine spezifischen Eigenschaften aus den Eigenschaften der verwendeten Ausgangswerkstoffe erhält (Zepf, 1997),
- **Faserwerkstoff:** Werkstoff, der durch seine spezifische Geometrie mit einem sehr großen Längen- zu Dicken-Quotient gekennzeichnet ist (Bergmeister, 2003),
- **Kalibrierung:** Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Messwert oder Erwartungswert der Ausgangsgröße und dem zugehörigen wahren oder richtigen Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Messgröße für eine betrachtete Messeinrichtung bei vorgegebenen Bedingungen (Pfeifer, et al., 2010),
- **KFV:** Klebstoff-Faser-Verbundwerkstoff (Werner, et al., 2008),
- **Klebstoff:** wird nach DIN EN 923 definiert als „nichtmetallischer Werkstoff, der Füge­teile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit verbinden kann“ (Deutsches Institut für Normung, 2008),
- **Kohäsivversagen:** Versagensform, bei der ein Bruch innerhalb eines homogenen Werk­stoffs erfolgt (Schürmann, 2007),
- **Kunststoff:** Synthetisch hergestelltes Polymer, das hauptsächlich auf Kohlenwasserstoff­verbindungen basiert, Polymere Klebstoffe stellen im ausgehärteten Zustand eine Unter­gruppe der Kunststoffe dar (Baur, et al., 2007).
- **Lastenausgleich:** Prinzip des Lastenausgleichs, angewendet auf Tragsysteme, bedeutet, dass auf ein System angreifende externe Lasten auf alle Elemente des Systems gleichar­tig verteilt werden, wobei die Elemente möglichst einen ähnlichen Auslastungsgrad auf­weisen (Meier, 2002),
- **Legierung:** metallischer Werkstoff, der aus mindestens zwei chemischen Elementen be­steht, von denen mindestens eines ein Metall sein muss (Ruge, et al., 2002),
- **Leichtmetall:** Metalle und Legierungen, die eine Rohdichte von $\rho < 5 \text{ g/cm}^3$ aufweisen (Hollemann, et al., 1995),
- **Material:** Sammelbegriff für Rohstoffe, Werkzeuge, Halbzeuge und Baustoffe (Pfeifer, 1997),
- **Matrix:** System, dass eine strukturelle Einbettung anderer Werkstoffe, unter Beibehaltung ihrer geometrischen Form, in sich ermöglicht (Trzesniowski, 2010),
- **Modellbildung:** Beschreibung für den Vorgang des Abbildens von Teilstücken der Realit­ät mit dem Ziel, diese zu analysieren und aus den Ergebnissen eine gewisse Übertrag­barkeit auf andere Sachverhalte zu ermöglichen (Bungartz, et al., 2009),
- **monolithisch:** aus einem Stück, eine untrennbare Einheit bildend (Fa. Brockhaus, 2007),
- **Orientierungseffekt:** Anisotrope Ausrichtung von Molekülgruppen oder Gefügestruk­turen, führt zu anisotropen Material- oder Werkstoffeigenschaften (Schürmann, 2007),
- **Plastische Verformungen:** Irreversible Verformungen, bei deren Auftreten Energie dissi­piert wird (Pfyl, 2003),
- **Redundanz:** Ein Tragsystem ist redundant, wenn bei Ausfall eines Systemtragelementes andere Elemente des Tragsystems diesen Ausfall kompensieren können (Weller, et al., 2010).
- **Robustheit:**
 - Fähigkeit eines Tragwerks und seiner Bauteile, Schädigungen oder ein Versagen auf Ausmaße zu begrenzen, die in einem vertretbaren Verhältnis zur Ursache stehen (Pfyl, 2003),
 - Unempfindlichkeit eines Systems oder Herstellungsverfahrens gegenüber Vorausset­zungsverletzungen (Bortz, et al., 2008),

- **Schrumpfmaß:** Definition für die Volumenänderung infolge eines Aushärtungsvorgangs
$$V_s = \frac{\text{Anfangsvolumen} - \text{Endvolumen}}{\text{Anfangsvolumen}} \quad (\text{Bergmann, 2002}),$$
- **Sprödbbruch:** Versagen ohne augenscheinliche Vorankündigung (Pfyl, 2003),
- **strukturelle Kopplung:** Verbindung zwischen mindestens zwei Elementen untereinander, die in der Lage ist, unterschiedliche Randbedingungen oder Zustände zwischen den gekoppelten Elementen zu übertragen (Ehrenstein, 2004),
- **System:** aus dem griechischem stammender Begriff, der übersetzt werden kann mit das Gebilde, Zusammengestellte oder Verbundene (Körtgen, 2010),
- **Tragfähigkeit:** Fähigkeit eines Tragwerks und seiner Bauteile, Einwirkungen während der Ausführung und Nutzung standzuhalten (Pfyl, 2003),
- **Tragsicherheit:** Sicherheit eines Tragwerks und seiner Bauteile gegenüber dem Versagen (Pfyl, 2003),
- **Validierung:** Kontinuierliche Überprüfung, ob ein Modell das Verhalten des abgebildeten Systems hinreichend genau wiedergibt (Rabe, et al., 2008),
- **Verifizierung:** aus dem lateinischem „*veritas*“ Wahrheit und „*facere*“ machen; Nachweis, dass ein vermuteter oder behaupteter Sachverhalt wahr ist (Haubelt, 2011),
- **Verbundwerkstoff:** aus mehreren Komponenten zusammengesetzter Werkstoff (Pfyl, 2003),
- **Verträglichkeit:** Eignung von Produkten, gemeinsam unter bestimmten Bedingungen benützt werden zu können, um wesentliche Anforderungen zu erfüllen, ohne unannehm-bare gegenseitige Auswirkungen hervorzurufen (Deutsches Institut für Normung, 2000),
- **Werkstoff:** aus Rohstoffen gewonnenes Ausgangsmaterial, das zur Herstellung von Halb-fabrikaten und Fertigerzeugnissen dient (Klappenbach, et al., 2005),
- **Zwischenfaserbruch:** Versagensform eines Faser-Matrix-Systems, bei dem das Initial-versagen durch einen Riss im Kunststoff oder der Faser-Matrix-Adhäsionsfuge ausgelöst wird (Schürmann, 2007),

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Begriffe Hybrid- oder Verbundsystem werden in einem sehr weit gespannten Kontext verwendet. Selbst wenn nur das Gebiet der Baukonstruktion betrachtet wird, existieren eine Anzahl unterschiedlichster Systeme, die unter diese Begriffe eingeordnet werden können. Prinzipiell kann die Bezeichnung „Hybrid“, die dem griechischem abstammt, übersetzt werden mit „von zweierlei Herkunft“ oder „etwas Gemischtes oder Gekreuztes“. Die Terminologie des hybriden Systems reicht damit geschichtlich gesehen sehr weit zurück.

Schon in der Anfangszeit des Bauens trifft man Verbundsysteme aus einfachsten Baumaterialien, wie Lehm vermischt mit Stroh. Später ist es die Verbundwirkung von massivem Stein mit metallischen Elementen, die z. B. Verklammerungen bilden oder notwendige Zugkräfte aufnehmen, im Bau von Kirchenkuppeln auch Vorspannung erzeugen. Der Holzbau benutzt schon sehr früh metallische Elemente, um die Qualität des Holzes durch Unterspannungen, z. B. in Hängewerken u. Ä., wesentlich zu steigern. Ein wirkliches Verbund- oder Hybridsystem stellt dann der zum Ende des 19. Jahrhunderts im großen Umfang industriell eingesetzte Stahlbeton dar. Hier wirken zwei unterschiedliche Werkstoffe zusammen und bringen gezielt ihre vorteilhaften Material- und Systemeigenschaften in ein Gesamtsystem ein. Dies ist mittlerweile so selbstverständlich, dass kaum über die Spezifik eines Hybridsystems nachgedacht wird.

Die Verbindung von Beton und Stahl kann aber auch im so genannten Stahlbetonverbundbau beobachtet werden, wo massive Stahlbetonplatten mit linienförmigen Stahlträgern gekoppelt werden. Auch dies stellt eigentlich ein Hybridsystem dar, wobei die Eigenschaften sich deutlich vom normalen Stahlbeton unterscheiden. Die Stahlbetonplatte und der Stahlträger haben in diesem System eigene Trag- bzw. Anwendungsfunktionen. Durch die Verbindung von Stahlträger und Stahlbetonplatte entsteht ein Gesamtsystem, das zusätzliche Tragreserven erschließen kann. Der Begriff des Hybridsystems bedarf daher einer Systematisierung, um zielgerichtet die notwendigen Untersuchungen durchführen zu können.

Die Materialentwicklung der letzten Jahrzehnte, sowohl auf dem Gebiet der legierten Metalle aber auch insbesondere der organischen Kunststoffe und Faserwerkstoffe, ergibt weitere Möglichkeiten, Hybridsysteme gezielt zu entwickeln. Dies ist sowohl in Hinsicht der Erhöhung der Trag- und Gebrauchseigenschaften von Bauteilen möglich, als auch zur Verbesserung z. B. von bauphysikalischen Eigenschaften (Pasternak, et al., 2003; Ruth, et al., 2010).

An grundlegenden Werkstoffen, die heute im Industrie- und Gesellschaftsbau zur Verfügung stehen und deren Trageigenschaften systematisch verbessert werden sollten, werden:

- Beton,
- Metalle, insbesondere Stahl und Aluminium,
- Holz und
- Glas in begrenztem Umfange

verwendet.

Wird als Zielstellung die Erhöhung der Tragfähigkeit bzw. der Steifigkeit von Bauelementen aus diesen Materialien angestrebt, sind Verbundmaterialien zu definieren, die in der Lage sind, dies zu ermöglichen. Prinzipiell kann dabei von flächenhaften Anordnungen und lokalen

diskreten Elementen, wie es die Bewehrung im Stahlbeton darstellt, ausgegangen werden. Eine flächenhafte bzw. volumenhafte Anordnung stellen z. B. metallische Nadeln in Beton dar, die als Stahlfaserbeton heute im Einsatz sind.

In den letzten Jahren fanden Systeme unter Einsatz unterschiedlichster Fasern eine umfassende Entwicklung. Prinzipiell lassen sich hier drei große Gruppen unterscheiden:

- Kunstfasern auf organischer Basis,
- Naturfasern und
- Metall- oder Glasfasern auf anorganischer Basis.

Diese Fasern stehen heute in verschiedenartigen Ausgangskonfigurationen zur Verfügung und werden für sehr unterschiedliche Zwecke eingesetzt. Naturfasern erfüllen aufgrund der wachstumsbedingten großen Streubreite ihrer mechanischen Eigenschaften nicht die Voraussetzungen für die hier betrachteten Problemstellungen. Im industriellen Einsatz sind heute Glasfasern, Kohlenstofffasern und polymere Fasersysteme weit verbreitet. Insbesondere auf dem Gebiet der Glas- und Kohlenstofffasern gibt es unterschiedlichste Entwicklungen und Einsatzgebiete zur Verstärkung tragender Elemente. Glasfasern finden im Wesentlichen ihr Einsatzgebiet in flächenhaften Konstruktionen bzw. als Halbzeuge in Stäbe gepresst für den Ersatz von Bewehrungsstäben in spezifischen Anwendungen des Betonbaus. Kohlefasern kommen unidirektional angeordnet in CFK-Lamellen oder in Matten, bei denen eine gewebte Struktur erzeugt wird, zum Einsatz. Denkbar ist allerdings auch die Mischung von kurzen Kohlenstofffasern mit Kunststoffen, wie Epoxidharzen, um damit eine Materialmischung herzustellen, die als volumenartiges Bauelement in Verbindung mit anderen Materialien, wie Beton oder Metallen, verwendet werden kann.

Neben den Fasern ist es auch denkbar, dass organische Kunststoffe in Verbund mit den genannten Werkstoffen eingesetzt werden, um spezifische Trag- oder Gestaltfestigkeitseigenschaften zu erfüllen.

1.2 Zielstellung

Die Herstellung tragender Strukturen im Bauwesen beinhaltet drei wesentliche Felder der Entwicklung (Spaethe, 1992; Petersen, 1993):

- Verwendung hochleistungsfähiger Werkstoffe, mit speziell auf den Anwendungsbereich zugeschnittenen Eigenschaften,
- Optimierung der Querschnittsformen bezüglich Leistungsfähigkeit, d. h. i. Allg. Erzielung von hoher Tragfähigkeit und Steifigkeit bei geringem Gewicht,
- Effektive Herstellung lastabtragender Systeme, die im Falle eines Materialversagens die Bauteilsicherheit durch eine definierte Resttragfähigkeit gewährleisten.

Mit diesen Ansätzen ist es möglich, unterschiedliche tragende Hybridwerkstoffe und -strukturen zu konstruieren, die im Bauingenieurwesen effektiv eingesetzt werden können. Dazu sollen zwei unterschiedliche faserverstärkte Tragsysteme diskutiert werden, bei denen die Faserverstärkung zu einer signifikanten Änderung der Trageigenschaften von bestehenden Systemen führt:

- Verstärkung von Klebstoffen mit Faserwerkstoffen, die das Anwendungsspektrum der Klebstoffe wesentlich erweitern,
 - Realisierung neuartiger Verbindungstechnologien im Bauwesen,
 - Anordnung zur Übertragung von Zugkräften,

- Kombination von hochfesten Aluminium und höchstfesten CFK-Lamellen zur Herstellung leichter und kompakter Tragelemente, die eine hohe Biegebeanspruchbarkeit aufweisen,
 - Reduzierung bisher notwendiger Bauteilmassen und -abmessungen,
 - Kombination aus der hohen Tragfähigkeit des CFK-Werkstoffes und der Montagefreundlichkeit des Aluminiumwerkstoffs.
 - Herstellung von Tragelementen mit optimaler Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit.

Der Einsatz von Kunststoffen erlaubt die Erstellung von hybriden Tragsystemen aus Glas, die in transparenten, tragenden Bauteilen eingesetzt werden können. Die Grundlagen dieser Systeme sollen vorgestellt und diskutiert werden.

- Kombination von steifen und im Versagensfall spröde reagierenden Glaselementen mit weichen und im Versagensfall duktil reagierenden Kunststoffelementen zur Erzeugung eines transparenten Hybridelementes mit redundanten Trageigenschaften,
 - redundantes Tragsystem: Tragwirkung des Glas-Kunststoff-Systems wird durch Glas oder Kunststoff generiert.
 - Im normalen Betriebszustand wird die Tragwirkung vorwiegend durch das Glas erzeugt.
 - Für den Fall einer Beschädigung des Glases werden die Kräfte auf den Kunststoff umgeleitet, und die Tragwirkung kann temporär gewährleistet werden.

Damit sind verschiedenartig wirkende lastabtragende Hybridsysteme genannt, die im Bauwesen verwendet werden können.

1.3 Vorgehensweise

Grundlage für die Entwicklung neuartiger Hybridsysteme ist die Analyse bestehender Hybridsysteme und verfügbarer Werkstoffe. Dabei ist die Erarbeitung einer Matrix möglicher Werkstoffkombinationen sinnvoll, um resultierende Eigenschaften von ausgewählten Werkstoffverbunden diskutieren zu können.

Im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung ist es erforderlich, Anforderungen und Randbedingungen zu definieren, die auf ein Hybridsystem einwirken. Die einzelnen Komponenten eines Hybridsystems sind derart anzuordnen, dass jede Systemkomponente seine spezifischen Werkstoffeigenschaften im Hybridsystem optimal einsetzen kann.

Eine Charakterisierung der kohäsiven und adhäsiven Eigenschaften von ein- und mehrkomponentigen Ausgangswerkstoffen im Mikro-, Meso- und Makrobereich erfolgt mittels numerischer und experimenteller Betrachtungen. Die Anwendung realitätsnaher Materialmodelle ist für die Aussagefähigkeit von analytischen und FEM-Analysen von zentraler Bedeutung. Durch einen Abgleich zwischen experimentell und numerisch ermittelten Daten ist es möglich, die Materialmodelle der im Hybridsystem eingesetzten Ausgangswerkstoffe zu kalibrieren und angenommene Systemzusammenhänge zu validieren.

Analytische, numerische und experimentelle Untersuchungen der mechanischen Zusammenhänge, insbesondere der:

- Steifigkeit,
- Festigkeit und
- Verträglichkeit

sind für eine Anwendung neu entwickelter Hybridsysteme notwendig und stellen die Grundlage für eine baurechtlich erforderliche Betrachtung von:

- Tragfähigkeit,
- Gebrauchstauglichkeit,
- Dauerhaftigkeit und
- Sicherheit

dar.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass auch experimentelle Untersuchungen an Hybridsystemen, insbesondere bei der Betrachtung der Dauerhaftigkeit, immer nur modellhafte Abbildungen von angenommenen Einflüssen beinhalten, die als Lastannahmen in die Untersuchung einfließen.

Eine Erarbeitung von Bemessungskonzepten auf Grundlage von Sicherheitsbetrachtungen und experimentellen sowie numerischen Untersuchungen ist für einen bautechnischen Einsatz lastabtragender Hybridsysteme erforderlich und wird für ausgewählte Hybridsysteme in Ansätzen gezeigt.

Die Entwicklung von Herstellungstechnologien ist für eine effiziente baupraktische Anwendung der Hybridsysteme notwendig. Es werden unterschiedliche Ansätze für die Herstellung der betrachteten Hybridsysteme diskutiert, die eine industrielle Anwendung der Hybridsysteme ermöglichen.

1.4 Abgrenzung

Im Rahmen dieser Abhandlung sollen lastabtragende Hybridsysteme betrachtet werden, bei denen mehrere Werkstoffe miteinander gekoppelt werden. Die Kopplung erfolgt über eine strukturelle Klebverbindung. Die betrachteten hybriden Systeme weisen, verglichen mit einfachen monolithischen Systemen, verbesserte Tragfähigkeiten und Gebrauchstauglichkeiten auf. Hybridsysteme zur Verbesserung von bauphysikalischen oder ähnlichen Eigenschaften werden nicht betrachtet. Ebenfalls nicht betrachtet werden Hybridsysteme, die unterschiedliche Technologien, wie z. B. Verbrennungs- und Elektromotor, miteinander kombinieren.

Die Untersuchungen werden analytisch, numerisch und experimentell durchgeführt. Für die numerische Betrachtung ausgewählter Hybridsysteme wird im Wesentlichen die Methode der finiten Elemente angewandt. Es werden kommerziell verfügbare FEM-Systeme verwendet und gegebenenfalls modifiziert, wobei eine Weiterentwicklung in der FEM hier nicht beabsichtigt ist. Der Einsatz bruchmechanischer Methoden zur Ermittlung systemkritischer Zustände ist für die Bemessung neuartiger Hybridsysteme nicht erforderlich, da in den Bemessungsansätzen Sicherheiten gegen partielles oder globales Versagen des betrachteten Systems vorgesehen sind (Pasternak, et al., 2012).

Die diskutierten faserverstärkten Hybridsysteme betreffen eine stochastisch räumlich verteilte Faseranordnung bei den KfV-Systemen und unidirektional gerichtete Faserverstärkungen bei den CFK-Lamellen-verstärkten Aluminiumtragelementen. Mehraxial gerichtete Faserge-

legesysteme, die z. B. im Automobil-, Boots- oder Schiffsbau verwendet werden, sind nicht Gegenstand der hier durchgeführten Untersuchungen (Kurek, 2004).

Es werden grundlegende Herstellungsmöglichkeiten der betrachteten Hybridsysteme aufgezeigt. Dazu gehören Randbedingungen der Herstellung, die aus den versuchsbedingten Produktionsverfahren abgeleitet werden können. Auf die detaillierte Erarbeitung effizienter Herstellungsverfahren als Grundlage einer gewerblichen Produktion dieser Systeme wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

1.5 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sechs Kapiteln untergliedert.

Im ersten Kapitel, der Einleitung, wird die Bedeutung der Hybridsysteme in unterschiedlichen Anwendungsbereichen dargestellt. In diesem Kapitel werden die Themenschwerpunkte und Zielstellungen der vorliegenden Arbeit skizziert und eine thematische Abgrenzung definiert.

In Kapitel zwei werden Grundlagen und Systemzusammenhänge von strukturellen Hybridsystemen beschrieben. Für die schwerpunktmäßig betrachteten Hybridsysteme wird der aktuelle Stand von Forschung und Entwicklung dargestellt. Die Konstruktionssysteme von strukturellen Hybridsystemen und deren Wirkungsweisen werden anhand von ausgewählten Beispielen erläutert. Dabei werden die Materialeigenschaften und deren Auswirkung auf die ausgewählten Hybridsysteme unter definierten Einwirkungen beschrieben. Weiterhin werden die im Rahmen dieser Arbeit angewandten Synthesemethoden der numerischen und experimentellen Analyse vorgestellt.

In Kapitel drei werden Klebstoff-Faser-Verbundwerkstoffe als ausgewählte hybride Werkstoffe beschrieben, die ausgezeichnete kohäsive und adhäsive Eigenschaften aufweisen. Im Rahmen der Untersuchungen werden analytische, numerische und experimentelle Betrachtungen geführt, die für ausgewählte KfV-Varianten und deren Anwendungsbereiche dargestellt werden.

In Kapitel vier werden Alu-CFK-Hybridelemente beschrieben, die ihre Verbundtragwirkung durch eine Kombination aus CFK-Lamellen und Aluminiumtragelementen erzielen. Die Hybridelemente ermöglichen die Verringerung des Eigengewichtes tragender Konstruktionselemente verglichen mit herkömmlichen, nur aus Aluminium bestehenden Tragelementen. Es werden umfangreiche analytische, numerische und experimentelle Betrachtungen der Verbundeigenschaften der Alu-CFK-Hybridelemente unter definierten Randbedingungen dargestellt. Dabei werden Wechselwirkungen und Systemzusammenhänge für dieses spezielle Hybridsystem analysiert und deren Auswirkungen auf die Verbundtragwirkung der Alu-CFK-Hybridelemente gezeigt.

In Kapitel fünf werden Glas-Kunststoff-Hybridelemente als tragende, vollständig transparente Hybridelemente beschrieben. Die Kombination von Glas und Kunststoff ermöglicht dabei die Herstellung eines Hybridsystems, das neben einer hohen Steifigkeit und Transparenz auch eine für den Einsatz in tragenden Konstruktionen notwendige Sicherheit aufweist. Im Rahmen der Untersuchungen werden analytische, numerische und experimentelle Betrachtungen durchgeführt. Der prinzipielle Aufbau der Hybridelemente wird an zwei Beispielen dargestellt und hinsichtlich der mechanischen Zusammenhänge analysiert. Das Kapitel schließt mit der Darstellung verschiedener Anwendungsmöglichkeiten von Glas-Kunststoff-Hybridelementen im Bauwesen.

In Kapitel sechs werden die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst. Weiterhin werden zukünftige Anwendungsmöglichkeiten genannt, die Hybridsysteme im Bauwesen betreffen.

Im Anhang werden unterschiedliche numerische und experimentelle Grundlagen und Untersuchungen dargelegt, die einen ergänzenden Charakter für die Arbeit darstellen.

2 Strukturelle Hybridsysteme im Bauwesen

2.1 Einführung

2.1.1 Grundlagen

In der aktuellen Entwicklung werden Verbundsysteme häufig als Hybridsysteme bezeichnet. Dieser Begriff wird sehr vielschichtig verwendet und im technischen Bereich als System definiert, in dem mehrere Technologien miteinander verbunden werden, z. B. ein Hybridauto als System aus Verbrennungsmotor und Elektromotor, die in einem Antriebsstrang gekoppelt werden (Küchler, 2009). In der vorliegenden Arbeit werden diese Technologien nicht betrachtet. Vielmehr erfolgt schwerpunktmäßig eine Betrachtung von hybriden Werkstoffen und Systemen, die im Bauwesen zur strukturellen Lastabtragung genutzt werden können. Es werden ausschließlich Hybridsysteme betrachtet, die in ihrer Kombination aus unterschiedlichen Werkstoffen während des Herstellungsprozesses nicht homogenisiert werden. Das mehrkomponentige System eines Stahls, der aus unterschiedlichen chemischen Elementen, wie Eisen und Kohlenstoff besteht, wird nach dieser Definition nicht als Hybridwerkstoff angesehen.

Strukturelle Hybridsysteme stellen eine Grundlage des heutigen Bauingenieurwesens dar und werden seit vielen Jahrtausenden in unterschiedlichsten Einsatzgebieten verwendet. Sie basieren auf dem Prinzip der Kopplung unterschiedlicher Materialien oder Werkstoffe mit dem Ziel, einen Verbundwerkstoff zu erzeugen, der spezifische, für die jeweils gewünschte Anwendung optimale Eigenschaften aufweist. Die Entwicklung mehrkomponentiger Hybridsysteme erfolgt immer in einem mehrstufigen Prozess. Am Anfang steht die Entwicklung oder Entdeckung von Werkstoffen, die dann in einem Prozess der Herstellung neuer Hybridsysteme miteinander kombiniert werden können. Diese Entwicklungsstufen erfolgen meist unabhängig voneinander (Bergmeister, 2003; Brameshuber, 2006).

Hybridsysteme sind oft sehr komplex aufgebaut. Die Bandbreite der in Hybridsystemen genutzten Werkstoffe umfasst nahezu jedes verfügbare Material. Stetige Verbesserungen oder Neuentwicklungen von Materialien ermöglichen damit auch Neuentwicklungen oder Verbesserungen der Hybridsysteme (Krenkel, 2009).

Erste Hybridsysteme wurden aus den vorhandenen Werkstoffen der Natur, wie z. B. Holz, Lehm, Stein und pflanzlichen oder tierischen Naturfasern, hergestellt. Mit der Entdeckung verschiedenartiger Metalle, Gläser, Mörtel und den ersten Arten des Betons erweiterten sich die Möglichkeiten der Hybridsysteme dann erheblich (Kaiser, et al., 2006).

Ein Werkstoff, der in vielen Hybridsystemen Verwendung findet, ist der um 1400 v. Chr. im arabischen Raum erstmals hergestellte Stahl. Durch spezielle Schmiedetechniken gelang es, aus dem Grundwerkstoff Eisen einen mechanisch hochbeanspruchbaren und sehr harten Werkstoff herzustellen, der zunächst in der Waffentechnik Verwendung fand. In Europa wurde Stahl erstmals um 800 v. Chr. von den Kelten hergestellt. Neue Herstellungsverfahren und spezielle Zulegierungen ermöglichen seitdem immer wieder Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften. Die aktuelle Spitze der Entwicklung höchstfester Stähle stellen derzeit spezielle Spann- oder Werkzeugstähle dar, die Zugfestigkeiten $f_u > 2.000 \text{ N/mm}^2$ aufweisen (Verein Deutscher Eisenhüttenleute, 1956; Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 4. Aufl. 2006). Ein geschichtlich gesehen sehr viel jüngerer metallischer Werkstoff ist das

erstmals um 1808 von Sir Humphry Davy beschriebene Aluminium. Mithilfe spezieller Legierungselemente konnte aus dem ursprünglich weichen Metall ein hochfester Werkstoff entwickelt werden, der heute in vielen technischen Anwendungen zu finden ist (Dehn, et al., 2003).

Die Entdeckung des Glases geht geschichtlich gesehen sehr weit zurück. Das aufgrund seiner transparenten oder transluzenten Eigenschaften einzigartige Material wurde zuerst in Perlenform als Schmuck verwendet. Ab ca. 1450 v. Chr. gelang es dann den Ägyptern erste Gefäße vollständig aus Glas zu fertigen (Oppler, 2010). Seitdem erfolgt eine stetige Weiterentwicklung dieses Werkstoffes, der aktuell für vielfältige Einsatzbereiche zur Verfügung steht. Die negative Eigenschaft des Glases, sein sprödes Versagen, schränkte bisher seine Verwendung als lastabtragenden Werkstoff stark ein. Ein möglicher Ansatz, dieser Sprödbrechgefährdung entgegenzuwirken und die mechanische Belastbarkeit des Glases zu steigern, besteht in der thermischen oder chemischen Vorspannung, durch die Oberflächendefekte überdrückt und mechanische Kerbstellen in ihrer Wirkung abgeschwächt werden. Das führt zu einer deutlichen Steigerung der Biegezugbeanspruchbarkeit des Glases und stellt die Grundlage für viele technische Anwendungen dar (Wörner, et al., 2001).

Durch die Entdeckung und Entwicklung von Kunststoffen entstand eine neue Gruppe von Materialien, die in modernen Hybridsystemen eine besondere Rolle spielen. 1834 entdeckte der Chemiker Justus von Liebig das Epoxidharz (Gesellschaft Deutscher Chemiker, 1980). Verwendung fanden Epoxidharze jedoch erst ca. 100 Jahre später, als Castan 1938 Experimente mit Gießharzen für Zahntechniker durchführte. Zwar stellte sich heraus, dass Epoxidharze für derartige Anwendungen wenig geeignet sind, die ermittelten Materialeigenschaften ermöglichten jedoch in der Folge eine Verwendung in vielen verschiedenen Bereichen (Beuschel, 1996). Seit den 30-er Jahren des 19. Jahrhunderts erfolgten umfangreiche Experimente an verschiedenartigen Kunststoffen. Acrylharz, als Grundlage für Acrylatklebstoff und Polymethylmethacrylat, wurde im Jahr 1927 von Otto Röhm entwickelt. Einer Forschergruppe um Otto Bayer gelang erstmals im Jahr 1937 die Synthese von Polyurethan. Die Herstellung wärmedämmender und mechanisch belastbarer Polyurethanschäume erfolgte dann ab dem Jahr 1952, wodurch sich das Anwendungsspektrum der Kunststoffe stark erweiterte (Marschall, 2000; Degischer, et al., 2009).

Die Entdeckung der heute als Hi-Tech-Werkstoff verbreiteten Kohlenstofffaser erfolgte im Jahr 1890 von Thomas Alva Edison, der Kohlenstofffasern als elektrische Glühfäden verwendete. Die herausragenden mechanischen Eigenschaften der Kohlenstofffasern blieben dabei vorerst unentdeckt. Erst die Kombination mit Kunststoffen brachte hier den entscheidenden Durchbruch, was in der Folge die Entwicklung vieler weiterer Kunststofffasertypen ermöglichte. Insbesondere in den 60-er und 70-er Jahren des 20. Jahrhunderts führten intensive Forschungstätigkeiten an polymeren Kunstfasersystemen u. a. im Jahr 1965 zur Entwicklung der Para-Aramidfaser durch DuPont, die aufgrund ihrer herausragenden mechanischen Eigenschaften insbesondere in der Ballistik eingesetzt wird (Jeromin, 2006).

Eine gezielte Kombination einzelner Werkstoffe zu einem hybriden System ermöglicht es, die spezifischen Werkstoffeigenschaften der im Hybridsystem enthaltenen Komponenten optimal nutzbar zu machen.

2.1.2 Geschichte und Katalogisierung der Hybridsysteme

Das Prinzip der hybriden Systeme ist in Natur und Technik sehr weit verbreitet und wird, historisch betrachtet, seit langem eingesetzt. In der Biologie der Pflanzen werden in mecha-

nisch hochbeanspruchten Bereichen oft Tragsysteme ausgebildet, die eine lastabtragende Wirkung mit Faserverbundsystemen generieren. Das Prinzip der lastabtragenden Hybridsysteme ist damit sehr alt und wurde von der Menschheit so gesehen erst in der jüngeren Zeit angewendet.

Archäologische Entdeckungen zeigen, dass hybride Tragelemente schon zu Zeiten der Pharaonen konstruiert wurden. In Tutanchamuns Grabmal, das ca. 1340 v. Chr. entstand, wurden Verbundbogentragwerke gefunden, bei denen auf der biegezugbeanspruchten Seite des Bogentragwerkes zur Erhöhung seiner Beanspruchbarkeit Tiersehnen aufgeklebt wurden. Auf der druckbeanspruchten Seite wurde zur Erhöhung der Biegefestigkeit des Bogens drucksteifes Horn angeordnet (Kinseher, 2003).

Der Bau von Häusern aus Lehm und Stroh stellt ebenfalls eine hybride Konstruktionsart dar, bei der der drucksteife Werkstoff Lehm mit dem zugfesten Werkstoff Stroh gekoppelt wird. Daraus ergeben sich konstruktive Vorteile einer Begrenzung von Rissweiten bzw. der Erhöhung von Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit sowie bauphysikalische Vorteile einer besseren Wärmedämmung solcher Häuser (Kaiser, et al., 2006).

Hybridsysteme bestehen aus unterschiedlichen Werkstoffen und stellen oft eine Kombination aus metallischen, nichtmetallischen, organischen oder anorganischen Materialien dar. Eine eindeutige Einteilung der Hybridsysteme in einzelne Gruppen ist damit sehr schwer möglich und auch unübersichtlich. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit erfolgt hier der Versuch, eine Gliederung zu erstellen, in der strukturelle Hybridsysteme hinsichtlich der verwendeten Ausgangswerkstoffe strukturiert werden, die die Haupttragwirkung des Systems generieren. Diese ist untergliedert in:

- Hybridsysteme mit Stein, Mörtel und Beton,
- Hybridsysteme mit legierten Metallen,
- Hybridsysteme mit Holz,
- Hybridsysteme mit Kunststoffen und/oder Kunstfasern und
- Hybridsysteme mit Glas.

Hybridsysteme mit Stein, Mörtel oder Beton

Stein, Mörtel und Beton gehören zu den am weitesten verbreiteten Werkstoffen des Bauwesens. Die Verwendung dieser Materialien in hybriden Systemen kann in eindrucksvollen Bauwerken bis zum Beginn unserer Zeitrechnung zurückverfolgt werden. Der Bau des Pantheons in Rom, das zwischen 118 und 125 n. Chr. errichtet wurde, war unter anderem nur mithilfe eines Hybridsystems aus Opus Caementitium, einer Art Beton, und Eisen möglich, wobei das Eisen die Ringzugkräfte der Kuppel aufnahm (Heene, 2008). Hier wurde aus dem drucksteifen Mehrkomponentensystem Beton und dem druck- und zugsteifen Eisen ein Verbundsystem geschaffen, bei dem jede der Einzelkomponenten im Verbundsystem optimal hinsichtlich ihrer Werkstoffeigenschaften beansprucht wird.

In gotischen Kirchen wurden ab dem Jahr 1140 Ketten und Zugstäbe aus Eisen verwendet, um die in der Kuppel und den Wandelementen auftretenden Spreizkräfte abzutragen (Schäfer, 1990).

Die Entwicklung des Stahlbetons begann im Jahr 1845, als der Franzose Joseph Monier erste Blumentöpfe und Gartenbänke mit in Beton eingelegten Eisenelementen herstellte (Wietek, 2010). 20 Jahre später erhielt er dafür ein Patent für die Bewehrung von Beton (Schmiedel, 1995).

Die Verstärkung biegezugbeanspruchter Betonbauteile mit Elementen aus Kohlenstofffaser-verstärktem Kunststoff (CFK) stellt insbesondere bei der Ertüchtigung und Revitalisierung bestehender Stahlbetonkonstruktionen eine interessante Alternative zu herkömmlichen Revitalisierungsmaßnahmen dar (Schröder, 2009). Dabei werden CFK-Lamellen im zugbeanspruchten Bereich angeordnet und entweder durch Einschlitzten in den Beton integriert oder direkt auf die Betonoberfläche aufgeklebt. Hier liegen erste Erfahrungswerte vor, die in verschiedenen Veröffentlichungen und bauaufsichtlich erteilten Zulassungen dargestellt sind (Pieplow, 2005; Schilde, et al., 2005; DIBt, 2006; DIBt, 2007; Schröder, 2009). In einem Patent wird das System eines Kohlefasertragelementes beschrieben, das eine Ummantelung aus ultra-hochfestem Beton erhält und damit eine Verbundtragwirkung aus beiden Werkstoffen erzielt (Hennecke, et al., 2005).

Hybridsysteme mit legierten Metallen

Die Hybridbauweise des Stahl-Verbundbaus geht auf den Engländer William Evans Ward zurück, der 1875 Experimente an Unterzügen mit einbetonierten I-Trägern durchführte (Schmiedel, 1995). Der Einsatzbereich des Eisen-Verbundbaus wurde ab dem Jahr 1888 erweitert, als gusseiserne Stützen mit Mörtel ummantelt wurden. Die damit entstehenden Eisen-Verbundstützen erhalten ihre Tragfähigkeit aus beiden Materialanteilen, wobei die Mörtelummantelung zusätzlich eine Schutzfunktion für die Eisenstütze übernimmt und speziell im Brandfall ihre Tragfunktion für eine bestimmte Zeit sicherstellt. Das Stahl-Verbundbauprinzip wurde erstmals im Jahr 1894 in zwei Bauwerken angewandt, der Brücke von Rock Rapids und dem Methodist Building in Pittsburgh. Als drei Jahre nach seiner Errichtung im Methodist Building ein Feuer ausbrach, konnte diese Bauweise ihre hervorragenden brandschutztechnischen Eigenschaften unfreiwillig unter Beweis stellen (Schmiedel, 1995). Seitdem hat sich das System des Walzträgers in Beton (WIB) vielfach durch seine guten bau- und brandschutztechnischen Eigenschaften bewehrt und erfährt seit ca. 1960 eine breite Anwendung (Schmiedel, 1995; Pasternak, et al., 2010; Kindmann, et al., 2009; Kessler, et al., 2010; Mehlhorn, 2010; Lange, et al., 2010).

Die Idee, Stahlbewehrung im Beton vorzuspannen, um Risse im Beton zu minimieren oder ganz zu unterdrücken, stammt von dem Amerikaner PH Jackson, der seine Überlegungen im Jahr 1886 öffentlich machte. Das erste deutsche Patent, das die Vorspannung von Stahlbewehrung in Beton aufgreift, wurde im Jahr 1888 von Wilhelm Döring angemeldet. Jedoch waren die realisierbaren Vorspannungen zu diesem Zeitpunkt relativ niedrig, sodass der statische Nutzen einer vorgespannten Konstruktion noch gering blieb. Erste Versuche des Vorspannens von Bewehrung aus Klavierseilen mit direktem Verbund zeigten bessere Erfolge. Die entscheidenden Schritte der Entwicklung erfolgten dann vom Franzosen Eugene Freyssinet, der zwischen den Jahren 1928 - 1936 verschiedene Patente für Spannpressen, Verankerungen usw. anmeldete. Die im Jahr 1937 gebaute Bahnhofsbrücke Aue wurde von Franz Dischinger entworfen und gilt als erste Spannbetonbrücke in Deutschland (Lohmeyer, et al., 2010). Die stetige Weiterentwicklung der Spannbetonbauweise führte zu den heute verwendeten hochfesten Stahllitzensystemen, die in Verbindung mit (ultra)-hochfestem Beton zu Spannbetontragwerken kombiniert werden (Schmidt, 2003; Schmidt, 2007).

Die Entwicklung des Stahlfaserbetons erfolgte zwischen den Jahren 1950 und 1960 mit Versuchen, bei denen kurze Stahldrähte in Beton eingelegt wurden. Ab dem Jahr 1970 wurden für diese Hybridbauweise spezielle Stahlfasern hergestellt, wodurch ein breiter bautechnischer Einsatz des Stahlfaserbetons möglich wurde. Stahlfaserbeton wird seitdem in statisch untergeordneten Betonbauteilen eingesetzt, wobei die Stahlfasern weniger für die Abtragung statischer Lasten als zur Verminderung der Rissentstehung verwendet werden (Erdem,

2002; Pfyl, 2003; Leutbecher, 2008; Wietek, 2010; Lohmeyer, et al., 2010). Das System des Faserbetons wird seitdem stetig weiterentwickelt. Im Rahmen aktueller Forschungsvorhaben wird die stochastisch verteilte Bewehrung aus organischen und textilen Faserwerkstoffen hergestellt (Brameshuber, 2006; Müller, et al., 2010).

Mischkonstruktionen aus unterschiedlichen Metallen haben ebenfalls eine weite Verbreitung und werden geschichtlich gesehen schon seit langem verwendet. Ein Beispiel stellt die Kopplung Stahl und Aluminium dar, die derzeit im Automobilbau häufig Verwendung findet. Ziel ist hier die Herstellung leichter und dennoch steifer, hochbeanspruchbarer Tragelemente. Die Kopplung der beiden Werkstoffe Stahl und Aluminium erfolgt meist über Klebverbindungen. Geschweißte Mischverbindungen sind aufgrund unterschiedlicher Schmelz- und Siedetemperaturen der Metalle nur mit hohem technischen Aufwand herzustellen. Desweiteren führt die elektrische Verbindung leitender Metalle mit unterschiedlichem Standardpotential E° zum Auftreten von Kontaktkorrosion. (Wendt, 2009).

Hybridsysteme mit Holz

Holz stellt einen der geschichtlich gesehen ältesten Werkstoffe zur Errichtung von Bauwerken dar. Für unterschiedliche Anwendungen können verschiedenartige Holzarten verwendet werden. Ein großer Nachteil von Holz als natürlich gewachsenen Werkstoff ist seine Streubreite der mechanischen Eigenschaften. Dazu kommen lokale Fehler, wie Verwachsungen oder Astlöcher, die die Tragfähigkeit von Holzbauteilen weiter einschränken. Die Entwicklung des modernen Holzbaus beginnt ab dem Jahr 1906 mit der Konstruktion und Patentierung von verleimten Holztragelementen. Diese sogenannte Hetzerbauweise geht auf den Ingenieur Otto Hetzer zurück und basiert auf dem Ansatz der Reduzierung der Streubreite der mechanischen Eigenschaften des Holzes unter Nutzung des Größeneffekts. Heute stellen verleimte Holztragelemente, die als Brettschichtholz bezeichnet werden, die Grundlage des modernen Holzbaus dar (Kolb, 2008; Blaß, et al., 2008; Neuhaus, 2009).

Die Verstärkung von Brettschichtträgern mit Aramid-, GFK- oder CFK-Lamellen ermöglicht die Entwicklung neuartiger Hybridsysteme, die das Anwendungsspektrum von Brettschichtholz deutlich erweitern. Die Biegebeanspruchbarkeit dieser Bauteile kann im Vergleich zu einfachen Brettschichtholzträgern durch eine nahezu beliebige Ertüchtigung des Zugbereiches deutlich erhöht werden. Dabei sind jedoch die kritischen Fragen des Verbundes zwischen Holz und den Verstärkungslamellen zu klären sowie mechanische Verbundsysteme zu entwickeln, die die Schubtragfähigkeit des Brettschichtholzes parallel zur Faserlängsrichtung $\tau_{||}$ erhöhen (Rice, et al., 1995; Blaß, et al., 2002; Pörtner, 2005; Kaiser, 2010).

Die Kombination von Beton mit Holz stellt eine weitere Hybridvariante dar, bei der druckfester Beton mit zugfestem Holz gekoppelt wird. Die Anwendung dieser Hybridbauweise bietet sich für den Einsatz in Brückenkonstruktionen an und ist auch schon realisiert worden (Simon, et al., 2009; Rautenstrauch, et al., 2010).

Hybridsysteme mit Kunststoffen und/oder Kunstfasern

Die Kombination verschiedener Kunststoffe mit Kunstfasern ermöglichte die Herstellung von faserverstärkten Hybridsystemen. Die Entwicklung des mechanisch hochbeanspruchbaren Kohlenstofffaser-verstärkten Kunststoffs geht auf das britische Unternehmen Royal Aircraft Establishment zurück, wo ab dem Jahr 1955 CFK als struktureller Werkstoff für den Bau von Flugzeugen eingesetzt wurde (Bergmeister, 2003). Seitdem wird CFK in vielen Anwendungsbereichen von der Luftfahrt- und Automobilindustrie bis zur Herstellung von Offshore Windkraftanlagen verwendet (Bergmeister, 2003; Hau, 2008; Degischer, et al., 2009; AVK, Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, 2010).

CFK-Lamellen, die aufgrund ihrer unidirektionalen Faserausrichtung ausgezeichnete Materialeigenschaften aufweisen, können in vielfältigen Anwendungen zur Verstärkung tragender Elemente verwendet werden. Eine Möglichkeit besteht in der Verstärkung von Stahlkonstruktionen, wobei der im Vergleich zu Stahl geringere E-Modul der CFK-Lamelle durch ein Vorspannen der CFK-Lamelle teilweise kompensiert werden kann (Pasternak, et al., 2003). Ein Tragwerk, das seine lastabtragende Wirkung nahezu vollständig über faserverstärkte Kunststoffe generiert, ist im Jahr 2005 errichtet worden. Dabei handelt es sich um eine Autobahnbrücke aus Kohlenstofffaser- und Glasfaser-Sandwich-Modulen mit einer Spannweite von $L = 46$ m. Diese sehr leichte Konstruktion zeichnet sich vor allem durch den Vorteil einer sehr geringen Montagedauer aus. Die Brücke konnte in einer Bauzeit von 2 Tagen errichtet werden, wovon die Errichtung der Tragkonstruktion nach einem Tag abgeschlossen war. Ein Nachteil dieser Konstruktionsweise besteht in den hohen Baukosten, die vor allem durch hohe Materialkosten entstehen (Gutierrez, 2005). Die Konstruktion von Brückentragwerken aus Faserverbundwerkstoffen wurde seit dem Jahr 2005 auch in anderen Verkehrsbauprojekten realisiert. Eine CFK-Balkenbrücke mit einer Spannweite von $L = 200$ m soll in der spanischen Stadt Cuenza errichtet werden und befindet sich derzeit in Planung (Meier, et al., 2011).

Die Kombination von Stahl und CFK stellt in der Luftfahrtindustrie eine Möglichkeit zur Reduzierung von Bauteilmassen dar, unter gleichzeitiger Beibehaltung der notwendigen Stabilität der strukturellen Elemente eines Flugzeuges. In einem Patent aus dem Jahr 2008 wird der Rumpf eines Luft- oder Raumfahrzeuges in CFK-Metall-Hybridbauweise in Kombination mit einem Metallrahmen beschrieben (Kolax, et al., 2008).

Aufgeschäumter Kunststoff ermöglicht die Herstellung moderner Tragelemente, die neben reinen strukturellen Trageigenschaften auch gute bauphysikalische Eigenschaften aufweisen. Erste Untersuchungen zu den strukturellen Eigenschaften sogenannter Sandwichelemente oder Sandwichfaltwerke erfolgten im Jahr 1975 u. a. von Lutz Scheider; seitdem werden diese Tragelemente in statischer und bauphysikalischer Hinsicht stetig weiterentwickelt (Scheider, 1975; Altenbach, et al., 1996).

Die Anwendung des Spritzgießens ermöglicht die Herstellung komplexer faserverstärkter Kunststoffbauteile. Hier werden thermoplastische Kunststoffe mit unterschiedlichen Faserwerkstoffen, hauptsächlich Natur- und Glasfasern mit polymeren Kunststoffen, zu Prepregs verwandelt und durch das Verfahren des Spritzgießens zu mechanisch hochbeanspruchbaren Bauteilen verarbeitet (Henn, 1998).

Kunststoffmodifizierte Betone (PCC) können zum Schutz und zur Instandsetzung von Beton oder als Sanierungs- und Reprofilierungsmörtel eingesetzt werden (Gieler, et al., 2006; Bode, 2009; Bode, et al., 2009; Dimmig-Osburg, et al., 2010). Durch die Kunststoffmodifikation wird die Rissneigung des Betons während der Erhärtungsphase stark reduziert, was Ausbesserungsarbeiten an schadhafte Bauteiloberflächen stark vereinfacht.

Hybridsysteme mit Glas

Aufgrund seiner spröden Eigenschaft ist der Werkstoff Glas für Zwecke der Lastabtragung im Bauwesen nur bedingt einsetzbar. Die aus Sicherheitsüberlegungen resultierenden Anforderungen nach einer definierten Resttragfähigkeit können mit strukturellen Systemen, die ausschließlich aus dem Werkstoff Glas bestehen, nicht erfüllt werden. Erste Überlegungen, die Auswirkungen eines Glasbruches in einer Konstruktion zu begrenzen, führten zu dem im Jahr 1892 von Frank Shuman entwickelten Drahtglas. Der eingelegte Metalldraht übernimmt dann im Fall eines Glasbruches die Sicherung einer gewissen Resttragfähigkeit. Jedoch füh-

ren Temperaturdehnungsunterschiede zwischen Metall und Glas zu Problemen, die den Einsatz von Drahtglas insbesondere bei großen Temperaturschwankungen erschweren. Daneben werden die optischen Eigenschaften des Glases stark beeinträchtigt, was insgesamt dazu führte, dass diese Art des Drahtglassystems aktuell nur noch selten zu finden ist (Akademischer Verein Hütte, 1925; Tomczyk, 2004).

Die Kombination von Glas mit transparenten Kunststoffen erlaubt es, Verbundglassysteme herzustellen, die im Falle eines Glasbruchs definierte Resttragfähigkeiten aufweisen. Ein Kunststoff, der i. Allg. in Verbundsicherheitsglas eingesetzt wird, ist der Schmelzklebstoff Polyvinylbutyral (PVB). Dieser Kunststoff ermöglicht durch seine hochduktile Eigenschaft die Herstellung von sogenannter Sicherheitsverglasung mit einem definierten Widerstand gegen Einbruch und Beschuss. Die ausgeprägten Kriecheigenschaften des PVB führen jedoch bei langzeitigen Belastungen des Verbundsicherheitsglases zur Reduzierung der Tragfähigkeit, was speziell im Falle eines Glasbruchs zu einer zeitlich begrenzten Fähigkeit des Lastabtrags führt (Schittich, et al., 2006; Moro, et al., 2009).

Es bestehen unterschiedliche Ansätze bezüglich des für Verbundsicherheitsglas verwendeten Glases. Teilvorgespanntes Glas bietet, aufgrund seines groben Bruchbildes, eine höhere Resttragfähigkeit als vollständig vorgespanntes Glas, was seinerseits durch ein feines, nahezu krümeliges Bruchbild eine sehr geringe Verletzungsgefahr durch offene Glaskanten sicherstellt (Hess, 2000; Wörner, et al., 2001; Kott, 2007).

In vielen Fassadensystemen wird Glas hauptsächlich für die Erzeugung eines transparenten Raumabschlusses verwendet. Strukturelle Beanspruchungen werden in diesen Fassadensystemen meist durch opake Metallrahmenkonstruktionen abgeleitet. Die strukturelle Funktion der Glaselemente beschränkt sich dann auf eine Aussteifung der Metallrahmenkonstruktion, die dadurch einen hohen Steifigkeitszuwachs erhält (Schittich, et al., 2006).

Glasfasern werden zur Lastabtragung in faserverstärkten Kunststoffen eingesetzt und stellen oft eine preiswerte Alternative zu teuren Kohlenstofffasern dar. Glasfasern weisen in Abhängigkeit zu ihrem Durchmesser z. T. sehr hohe Zugfestigkeiten auf. Die Steifigkeit dieser Fasern ist jedoch im Vergleich zu Kohlenstofffasern relativ niedrig, da die atomaren Ketten des Glases aufgrund seiner amorphen Struktur eine isotrope Orientierung aufweisen (Schürmann, 2007; Eyerer, et al., 2008; Domininghaus, 2008).

2.1.3 Grundlegende Anforderungen

Die aktuelle Situation zeigt, dass auf vielen Gebieten Hybridsysteme im Einsatz sind und die heute vorhandenen Hightech-Materialien, wie Kohlenstoff-, Polymer- oder Bohrfasern, Möglichkeiten bieten, gezielt an effektiven neuen Hybridwerkstoffen zu arbeiten. Bei der Herstellung neuer Hybridsysteme geht es dabei um die Kombination von verfügbaren Werkstoffen, die im Verbundsystem über verbesserte Eigenschaften, wie z. B.:

- erhöhte Steifigkeit und Tragfähigkeit,
- verringertes Gewicht oder
- verbesserte Korrosionswiderstandsfähigkeit

verfügen (Dehn, et al., 2003; Degischer, et al., 2009). Dabei sind unterschiedlichste Randbedingungen zu beachten. Die Werkstoffe müssen untereinander verträglich sein, sie müssen miteinander über Klebverbindungen oder mechanische Kopplungen kombinierbar sein und sie müssen sich in ihren mechanischen Eigenschaften sinnvoll ergänzen (Moser, 1992; Michaeli, et al., 1995; Krenkel, 2003; Flemming, et al., 2003; Kalweit, et al., 2006; Herning, et al., 2007; Krenkel, 2009). Grundlegende Kennwerte, die für die Leistungsfähigkeit eines Hyb-

ridsystems eine Rolle spielen, könnten unterteilt werden in (Zepf, 1997; Neitzel, et al., 2004; Degischer, et al., 2009):

- Systemleistungsfähigkeit, definiert durch:
 - Steifigkeit,
 - Festigkeit,
 - elastische Dehngrenzen und Bruchdehnungen,
 - Spröbruch oder Duktilbruch,
 - Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften,
 - Medienbeständigkeit und
 - Dauerhaftigkeit

und:

- Systemverträglichkeit, definiert durch:
 - Oberflächeneigenschaften / Adhäsionseigenschaften,
 - Temperaturdehnungen,
 - nichtlineares Last-Verformungs-Verhalten und
 - elektrische Eigenschaften.

Aus diesen Anforderungen, die an ein lastabtragendes hybrides Bauteil gestellt sind, können wesentliche Designparameter für ein geeignetes Hybridsystem abgeleitet werden. Dazu gehören (Brockmann, et al., 2005; Geiß, 2006; Geiß, et al., 2007; Krenkel, 2009):

- Materialauswahl und Kombination,
- Konstruktionsformen, Verbindungen, Oberflächenparameter und
- Fertigungsparameter.

Neben diesen konstruktiven Aspekten sind eine Reihe weiterer Randbedingungen zu beachten, die für den Erfolg oder Misserfolg eines Hybridsystems im Bauwesen eine Rolle spielen. Dazu gehören Kriterien der

- Wirtschaftlichkeit und
- Nachhaltigkeit.

Aspekte der Wirtschaftlichkeit sind oft schwer langfristig abzuschätzen, da für neu entwickelte Hybridsysteme, speziell bei Einsatz neuartiger Hi-Tech-Werkstoffe die Material- und Fertigungskosten langfristig nicht abgeschätzt werden können (Flemming, et al., 2003).

Die Bedeutung des Wortes Nachhaltigkeit ist meist nicht scharf abgegrenzt, was diesen Begriff nahezu universell anwendbar macht. Er umfasst Aspekte des Naturschutzes, der Ökologie und der Ressourcenschonung (Ninck, 1997; Grunwald, et al., 2006; Althaus, 2009). Betrachtungen der Nachhaltigkeit eines Bauteils oder einer Bauweise sollten ganzheitlich erfolgen und die Aspekte der

- Werkstoffherstellung,
- Nutzung,
- Entsorgung und Recycling

beinhalten. Diese Vorgehensweise beruht besonders bei neu entwickelten Hybridsystemen auf vielfältigen Abschätzungen, die am Anfang einer Produktnutzung nicht genau zu quantifizieren sind (Ninck, 1997; Graubner, et al., 2003). Betrachtungen zur Nachhaltigkeit können aus unterschiedlichen Blickwinkeln erfolgen. So werden bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Naturfasern pflanzliche Naturfasern oft effizienter eingeordnet als tierische Naturfasern. Naturfasern weisen oft Vorteile gegenüber der Nachhaltigkeit von Kunstfasern auf, was vor

allein die regenerative Produktion betrifft. In Bezug auf den produktionseinheitsbezogenen Wasserbedarf und auch den Flächenbedarf, der für die Herstellung von Faserwerkstoffen einzurechnen ist, bestehen jedoch keine wesentlichen Unterschiede zwischen Natur- und Kunstfasern (Makkie, 2010).

Grundsätzlich sollte bei der Entwicklung neuer Hybridsysteme die Möglichkeit einer einfachen Wiederverwertung des Systems nach dem Nutzungszeitraum geschaffen werden. Möglichkeiten des Recyclings sind dabei immer den Möglichkeiten des Downcyclings vorzuziehen (Petersen, 2004; Prammer, 2009). Durch Recycling ist es möglich, einen Großteil der Energie einzusparen, die bei der erstmaligen Gewinnung der Werkstoffe aus dessen Rohstoffen aufgewendet werden müssen. Am Beispiel der Wiederverwertung von Aluminium zeigen Untersuchungen, dass der durchschnittliche Energiebedarf zur Herstellung von Sekundäraluminium nur ca. 5 % des Energiebedarfs beträgt, der für die Herstellung von Primäraluminium erforderlich ist (Roos, et al., 2011).

Im folgenden Abschnitt 2.2 werden ausgewählte Hybridsysteme für den Einsatz im Bauwesen vorgestellt. Dabei werden Grundlagen der Materialkombination erläutert und spezielle Anwendungsbereiche von Hybridsystemen dargestellt.

2.2 Ausgewählte Hybridsysteme

2.2.1 Grundlagen

Strukturelle Hybridsysteme sind im Bauwesen sehr weit verbreitet. Anforderungen, die an Hybridsysteme gestellt werden, unterscheiden sich daher sehr stark voneinander und werden maßgeblich durch Nutzungskriterien und äußere Randbedingungen beeinflusst. Unter Ausschluss von Kostenbetrachtungen, die einen wesentlichen Parameter der Anwendung darstellen, werden an Hybridsystemen für den Einsatz im Bauwesen die in Abbildung 2.1 dargestellten Anforderungen definiert (Petersen, 1993). Diese Anforderungsschwerpunkte stehen oft in Interaktion miteinander und können als Entwicklungsschwerpunkte bei der Herstellung neuartiger Hybridsysteme betrachtet werden.

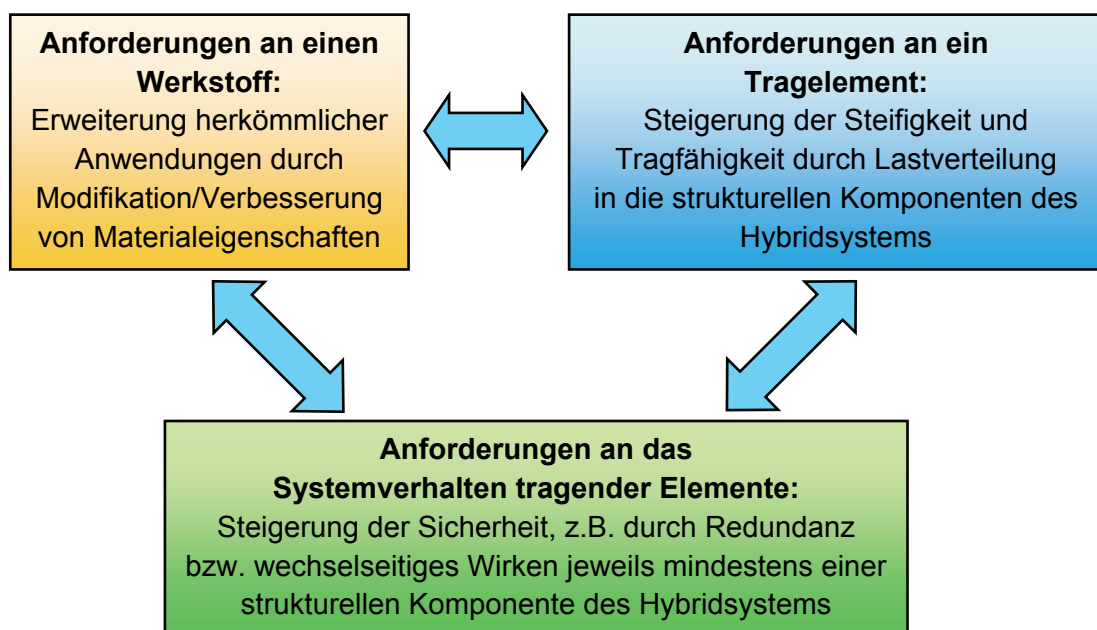


Abbildung 2.1: Spezielle Anwendungsbereiche von Hybridsystemen

Im Rahmen dieser Arbeit soll für jeden dieser Anforderungsschwerpunkte ein konkretes Hybridsystem analysiert werden. Die dafür eingesetzten Ausgangswerkstoffe sind in geeigneter Form zu kombinieren, sodass die genannten Zielstellungen unter definierten Randbedingungen gestellten Anforderungen erfüllt werden können.

Die Anforderungen an einen hybriden Werkstoff können am Beispiel eines Strukturklebstoffs skizziert werden. Klebstoffe, die sich vorwiegend durch ihre guten adhäsiven Eigenschaften auszeichnen, können zur strukturellen Verbindung von Bauteilen nur in relativ geringen Schichtdicken angewendet werden. Bei dickschichtigen Anwendungen wirken sich die eingeschränkten kohäsiven Eigenschaften, wie Steifigkeit und Zugfestigkeit sowie die Schrumpfung des Klebstoffs während des Aushärtvorgangs, negativ auf die Festigkeitseigenschaften der Klebverbindung aus. Damit ist das Einsatzspektrum von einfachen Klebstoffen beschränkt auf flächig dünnlagige Verbindungsformen. Um den Einsatzbereich der Klebstoffe auf dickschichtige Anwendungen zu erweitern, muss der Klebstoff in geeigneter Weise modifiziert werden. Dabei sind in erster Linie die kohäsiven Eigenschaften des Klebstoffs zu verbessern.

Die Anforderungen an ein hybrides Tragelement sollen am Beispiel eines vorwiegend biegebeanspruchten Leichtmetallverbundelements dargestellt werden. Leichte und montagefreundliche Tragelemente für den Einsatz im Bauwesen werden heutzutage vorwiegend aus Aluminiumwerkstoffen hergestellt. Die Tragelemente zeichnen sich durch ein gutes Tragfähigkeits- zu Eigengewichts-Verhältnis aus, das jedoch durch die Materialeigenschaften des Aluminiums begrenzt ist. Eine Möglichkeit, die eigengewichtsbezogene Tragfähigkeit dieser Elemente weiter zu erhöhen, besteht in der Herstellung eines hybriden Systems, bei dem hochfeste Aluminiumlegierungen mit leichten und hochfesten Werkstoffen kombiniert werden. Damit soll eine signifikante Steigerung der Steifigkeit und Tragfähigkeit unter Beibehaltung einer geringen Bauteilmasse erzielt werden. Die Aluminium-Hybrid-Tragelemente sollen eine möglichst hohe elastische Tragfähigkeit aufweisen, wodurch die Gebrauchstauglichkeit eines solchen Elementes positiv beeinflusst wird. Das setzt ein hybrides Tragelement voraus, in dem einwirkende Beanspruchungen auf die einzelnen Werkstoffe lastausgleichend verteilt werden.

Die Anforderung an das Systemverhalten tragender Elemente kann am Beispiel eines Glas-Hybrid-Elementes dargestellt werden. Sicherheitsüberlegungen führen im Bauwesen immer zu einer Forderung nach der Fähigkeit eines Tragsystems, ein bevorstehendes Versagen anzukündigen, um die Gefährdungen der Nutzer im Schadensfall zu reduzieren. Mit Tragsystemen aus Glas kann diese Anforderung, aufgrund des spröden Versagensbildes, nicht realisiert werden. Die Anforderung an das Systemverhalten eines strukturell tragfähigen Glas-Hybrid-Elementes wird über eine definierte Resttragfähigkeit erfüllt, die nach Eintreten eines spröden Glasbruchs sichergestellt werden muss. Das kann durch die Ausbildung plastischer Systemreaktionen und einer definierten Bauteilduktilität erzielt werden. Infolge des plastischen Tragverhaltens reduziert sich die Gesamtsteifigkeit des Tragsystems, was die Erkennbarkeit eines Systemversagens gestattet. Ein solches System muss eine definierte Redundanz im Tragverhalten aufweisen, so dass bei einem Glasbruch die vorhandene Last vom Glas in einen anderen Werkstoff umgelagert werden kann. Aus konstruktiv-gestalterischer Hinsicht soll das Hybridsystem eine Transparenz oder weitgehende Transluzenz aufweisen. Damit können transparente und gleichzeitig tragende Elemente im Bauwesen eingesetzt werden, die neue Anwendungen im Bauwesen ermöglichen.

2.2.2 Werkstoffauswahl

Grundlagen

Für die erfolgreiche Herstellung eines Hybridsystems oder -werkstoffs sind Kenntnisse über die spezifischen Materialeigenschaften der verwendeten Ausgangswerkstoffe erforderlich. Diese Eigenschaften sind mit den im Bauwesen üblichen Randbedingungen, wie z. B. einem Temperaturwechselbereich $-40\text{ °C} \leq \vartheta \leq 80\text{ °C}$, abzugleichen. Neben den mechanischen oder optischen Materialeigenschaften sind dabei auch Materialeigenschaften von Bedeutung, die eine Verträglichkeit von Materialien oder Werkstoffen untereinander charakterisieren. Dazu gehören beispielsweise:

- elektrische Eigenschaften und die
- thermische Dehnung.

Die physikalischen Grundeigenschaften vieler Metalle sind meist in Datenblättern oder Normen zusammengestellt (Hesse, 2007; Deutsches Institut für Normung, 2007). Kunststoffe werden hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften jedoch oft nur lückenhaft beschrieben und weisen zudem ein stark temperaturabhängiges Verhalten auf (Zepf, 1997; Rosato, et al., 2001; Menges, et al., 2002; Ahlers-Hestermann, 2004; Ehrenstein, et al., 2007; Meier-Westhues, 2007; Baur, et al., 2007; Bonnet, 2009).

In der vorliegenden Arbeit werden schwerpunktmäßig Hybridsysteme untersucht, die aus den im vorigen Abschnitt 2.1.3 skizzierten Anforderungen hervorgehen. Die dafür benötigten Ausgangswerkstoffe können eingeteilt werden in:

- Kunststoffe,
 - Kunststoff als Klebstoff,
 - Kunststoff als Tragelement, z. B. Polycarbonat (PC) und Polymethylmethacrylat (PMMA),
- Faserwerkstoffe und Faserverbundwerkstoffe,
 - Kunstfasern, wie z. B. Kohlenstofffasern, Glasfasern, Polymerfasern,
 - faserverstärkte Kunststoffe, wie z. B. CFK-Lamellen,
- Aluminiumlegierungen als Leichtmetall und
- Glas.

Wesentliche mechanische Eigenschaften ausgewählter Werkstoffe, die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden, sind in Tabelle 2-1 relativ zueinander definiert.

Werkstoff	Steifigkeit	Zugfestigkeit	Druckfestigkeit	Versagensform
Kunststoff / Klebstoff	sehr gering	gering bis mittel	gering bis mittel	spröde bis duktil
Kunststoff (PC)	sehr gering	gering bis mittel	gering bis mittel	sehr duktil
Kunststoff (PMMA)	gering	gering bis mittel	gering bis mittel	spröde
Faserwerkstoff (C-Faser)	sehr hoch	sehr hoch	keine	spröde
GFK	mittel	hoch	mittel bis hoch	spröde
CFK	sehr hoch	sehr hoch	hoch	spröde
Aluminium	mittel	mittel bis hoch	mittel bis hoch	duktil
Glas	mittel	gering	hoch	spröde

Tabelle 2-1: Grundlegende Betrachtung der mechanischen Eigenschaften ausgewählter Werkstoffe

Diese mechanischen Materialeigenschaften stellen eine wesentliche Grundlage der Werkstoffauswahl für hybride Systeme dar. Eine Auswahl der mechanischen Eigenschaften speziell betrachteter Ausgangswerkstoffe wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Kunststoffe

Die industrielle Verwendung von polymeren Kunststoffen in der Automobil- und später auch in der Bauindustrie hat seit den 90-er Jahren des vergangenen Jahrhunderts stark zugenommen (Menges, et al., 2002).

Bei Anwendung des Kunststoffs als Verbindungswerkstoff bzw. -element wird der Kunststoff als Klebstoff definiert. Der Kunststoff bzw. Klebstoff stellt dann eine strukturelle Verbindung zwischen unterschiedlichen Werkstoffen her (Adhäsion kleben & dichten, 2010).

Nach ihrem Verfestigungsmechanismus können Klebstoffe eingeteilt werden in (Adhäsion kleben & dichten, 2010):

- Physikalisch abbindende Klebstoffe,
- Chemisch härtende Klebstoffe und
- Klebstoffe ohne Verfestigungsmechanismus.

Im Rahmen dieser Arbeit werden vorwiegend anaerob chemisch härtende Klebstoffe verwendet. Diese Klebstoffsysteme bieten sehr vielfältige Anwendungsmöglichkeiten und weisen z. T. sehr hohe Festigkeiten auf. Das Aushärten dieser Klebstoffe stellt einen irreversiblen Mechanismus dar. Daher sind Klebverbindungen aus chemisch härtenden Klebstoffen ungeeignet für die Herstellung von Montageverbindungen. Die Bandbreite der mechanischen Eigenschaften chemisch härtender Klebstoffe ist sehr groß (Geiß, 2010; Baur, et al., 2011). Sie umfasst sehr weiche Klebstoffe z. B. Silikone, aber auch sehr steife Klebstoffe, wie z. B. Cyanacrylat-Klebstoffe, die in ihren mechanischen Eigenschaften den Polymethylmethacrylaten sehr ähneln (siehe Abbildung 2.2). Ergänzende Betrachtungen zu unterschiedlichen Verfestigungsmechanismen sind im Anhang in Abschnitt A.4 dargelegt.

Die Schrumpfung von Klebstoffen während der Aushärtung führt zur Ausbildung geometrieabhängiger Dehnungen, die für die Herstellung spezieller Klebverbindungen problematisch sein können. Daher werden für Klebstoffe i. Allg. spezielle Anwendungsrichtlinien definiert, die den Einsatzbereich dieses Verbindungsmittels eingrenzen (Adhäsion kleben & dichten, 2010).

Bei der Verwendung spezieller Kunststoffe als Tragelemente wird der Kunststoff als tragendes Konstruktionsteil beansprucht. Die Systemsteifigkeit wird dann auch von den geometrischen Dimensionen und der Steifigkeit des Kunststoffs bestimmt. Die Eigenschaften von Kunststoffen sind sehr stark von den Eigenschaften ihrer Ausgangspolymere und der einwirkenden Temperatur abhängig (Menges, et al., 2002; Habenicht, 2009). Am Beispiel eines Polycarbonats und eines Plexiglasses kann die Bandbreite der in Abbildung 2.2 dargestellten mechanischen Eigenschaften von optisch und haptisch sehr ähnlichen Kunststoffen aufgezeigt werden. Niedrige Temperaturen führen bei Kunststoffen zu einer erhöhten Steifigkeit und i. Allg. auch zu erhöhten Festigkeitswerten. Bei hohen Temperaturen verliert der Kunststoff seine mechanische Stabilität.

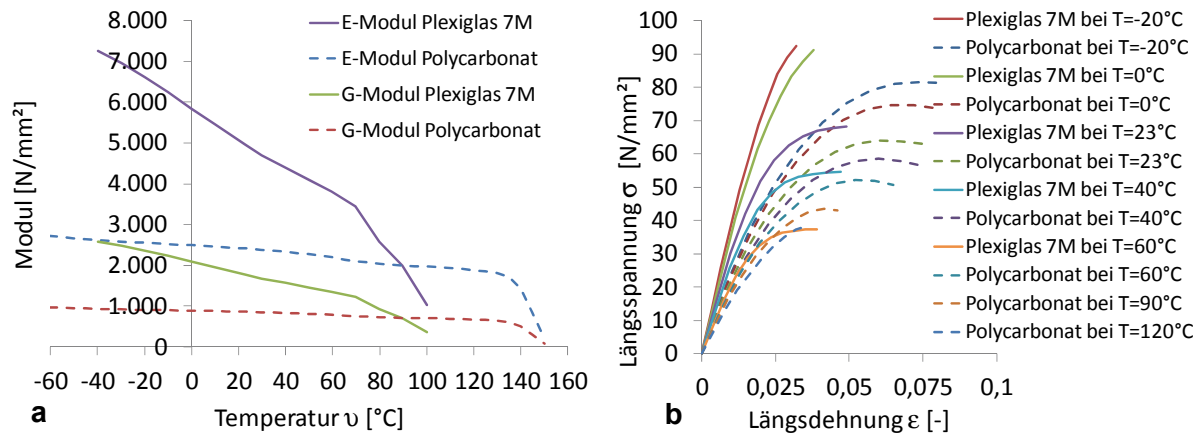


Abbildung 2.2: Mechanische Eigenschaften eines Polycarbonats und eines Polymethylmethacrylats in Abhängigkeit der Temperatur (Baur, et al., 2011); a: Elastizitäts- und Schubmodul; b: nominelles Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Alterungseinflüsse haben ebenfalls eine besondere Bedeutung für die Beschaffenheit der Kunststoffe (Mattes, 2007). Unter dauerhafter mechanischer Beanspruchung weisen Kunststoffe zudem ein zeitabhängiges mechanisches Materialverhalten auf, das von verschiedenen Einflüssen, wie Temperatur, Belastungsniveau, Belastungsgeschwindigkeit und Materialvorgeschichte, abhängig ist.

Faserwerkstoffe

Faserwerkstoffe sind gekennzeichnet von einem sehr großen Längen- zu Dickenverhältnis. Dieses Verhältnis übt einen großen Einfluss auf deren mechanischen Materialeigenschaften aus. Faserwerkstoffe sind gekennzeichnet durch sehr hohe Zugfestigkeiten in Faserlängsrichtung, in Druckrichtung haben Fasern i.d.R. keine messbaren Festigkeiten sondern weisen ein Stabilitätsversagen auf. Die mechanischen Eigenschaften von Fasern werden von zwei grundlegenden Effekten bestimmt (Fourné, 1995; Krenkel, 2003; Schürmann, 2007; AVK, Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, 2010):

- dem Größeneffekt und dem
- Orientierungseffekt.

Als Größeneffekt wird der statistische Einfluss von Fehlstellen auf die Festigkeit des Werkstoffs bezeichnet. Einzelne Fehlstellen wirken sich in Faserwerkstoffen jeweils nur auf die Festigkeit der betroffenen Fasern aus und haben auf ungeschädigte Fasern keinen Einfluss. Bei kompakten Werkstoffen, wie z. B. einer Glasplatte, beeinflussen einzelne Fehlstellen die Festigkeit des gesamten betroffenen Bauteils. Der Größeneffekt führt bei allen Fasern zu einer wesentlichen Erhöhung der Zugfestigkeit, verglichen mit der Zugfestigkeit eines kompakten Probekörpers aus gleichem Material.

Der Orientierungseffekt entsteht durch die Ausrichtung der atomaren Ketten innerhalb der Fasern. Folge der Orientierung ist die Ausbildung einer charakteristischen Anisotropie, bei der die Steifigkeit der Fasern auf die Faserlängsrichtung konzentriert wird. Der Effekt der Orientierung der Molekülketten in Faserlängsrichtung wird bei Kunstfasern durch den Herstellungsprozess hervorgerufen (Rösler, et al., 2006). Dafür eignen sich besonders Werkstoffe mit langkettigen Molekülen, wie z. B. Kohlenstofffasern, aber auch Polyethylenfasern oder Aramidfasern. Bei Naturfasern, wie Hanf oder Wolle, entsteht dieser Effekt während des Wachstums. Fasertypen, wie Glasfasern oder Basaltfasern, weisen eine amorphe Molekülstruktur auf und bilden keine Orientierungsrichtung in den Molekülketten aus (Schürmann, 2007). Abbildung 2.3 zeigt schematisch die Orientierung der Molekülketten in Fasern.

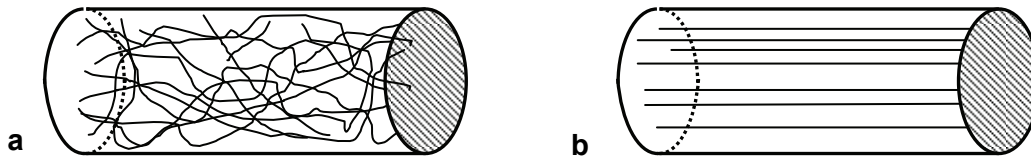


Abbildung 2.3: Darstellung des Orientierungsgrades bei Fasern; a: ungerichtete Molekülketten; b: starke Orientierung der Molekülketten in Faserlängsrichtung (Neitzel, et al., 2004)

Oft wird an Faserwerkstoffe die Anforderung eines geringen Gewichts in Kombination mit einer hohen Festigkeit gestellt. Aufgrund des Wunsches nach einer möglichst geringen Dichte sind die Elemente aus den ersten beiden Reihen des Periodensystems, wie z. B. B, C, Si, für die Herstellung von Faserwerkstoffen besonders interessant (Hollemann, et al., 1995). Ein Parameter, der das Verhältnis zwischen Dichte und Festigkeit beschreibt, ist die Reißlänge einer Faser. Sie ist als theoretische Länge definiert, bei der eine frei hängende Faser infolge der eigenen Gewichtskraft abreißt (Bürgel, 2005; Klein, 2011). Damit gilt:

$$L_R = \frac{f_u}{\rho \times g} \quad (2.1)$$

Spezifische Reißlängen verschiedenartiger Werkstoffe sind in Tabelle 2-2 dargestellt.

Werkstoff	Zugfestigkeit f_u [N/mm ²]	Dichte ρ [g/cm ³]	Reißlänge L_R [km]
Aluminiumlegierung	500	2,7	19
Stahl	2.000	7,8	26
Glasfaser	3.500	2,6	140
Kohlenstofffaser	4.500	1,8	255
Kevlar	3.600	1,4	260
Polyethylen	3.500	1,0	360

Tabelle 2-2: Reißlänge und spezifische Festigkeit unterschiedlicher Werkstoffe (Bürgel, 2005; Klein, 2011)

Die Forderung nach hoher Festigkeit und Steifigkeit wird von Elementen erfüllt, die starke atomare Bindungen aufbauen. Fasergeometrie und -steifigkeit beeinflussen die Verbundeigenschaften und den Verarbeitungsprozess der Fasern maßgeblich.

Ein für den Faser-Matrix-Verbund wesentlicher Faktor:

$$\frac{\text{Faserumfang } U}{\text{Faserquerschnittsfläche } A},$$

bestimmt zusammen mit den Steifigkeiten von Faser und Matrix die auftretenden Scherbeanspruchungen im Faser-Matrix-Verbund. Ein im Verhältnis zum Querschnitt großer Faserumfang führt zu einer größeren Adhäsionsfläche bezogen auf den Faserquerschnitt. Geringe Faserdurchmesser sind somit bei Verbundbetrachtungen im Vorteil.

Bei der Verwendung sprödelastischer Fasern ist der minimale Biegeradius R_{\min} als verarbeitungstechnisch relevanter Parameter zu beachten. Er ergibt sich aus der Krümmung, bei der die Zugfestigkeit am äußeren Faserrand durch Biegung erreicht wird. Es gilt:

$$R_{\min} = \frac{E_{\text{Faser}} \times d_{\text{Faser}}}{2 \times f_{u, \text{Faser}}} \quad (2.2)$$

Bei duktilen Faserwerkstoffen treten bei Unterschreitung von R_{\min} Plastizierungen auf, wobei als Grenzspannung hier die Fließgrenze f_y einzusetzen ist. Sprödbrechgefährdete Faserwerkstoffe brechen bei Unterschreitung von R_{\min} , was bei der Verarbeitung dieser Fasern betrachtet werden muss. Fasern mit geringem Durchmesser und hohen Festigkeiten bieten aufgrund ihres einfacheren Handlings Vorteile in der Verarbeitung.

Aktuell stellt die Kohlenstofffaser die Spitze der heutigen Fasertechnologie dar, da sie in der Gesamtheit der mechanischen Eigenschaften eine einzigartige Kombination von Steifigkeit, Festigkeit und Biegsamkeit aufweist. Sie verdrängt damit die Borfaser, die bei ähnlich guten mechanischen Eigenschaften, aufgrund des vielfach größeren Faserdurchmessers von $d \approx 50 \mu\text{m}$ gegenüber einer Kohlenstofffaser mit $d \approx 7 \mu\text{m}$, schlechtere Verarbeitungseigenschaften aufweist.

Aluminium

Bei den im Bauwesen verwendeten Aluminiumwerkstoffen handelt es sich fast ausschließlich um Aluminiumlegierungen, die hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften optimiert sind. Die Eigenschaften der Legierungen sind von der chemischen Zusammensetzung, der Gefügestruktur und der Ausrichtung der Kristallgitter abhängig. Bei gewalzten oder stranggepressten Aluminiumlegierungen kann eine Analogie zum bei Faserwerkstoffen beschriebenen Orientierungseffekt festgestellt werden (Europäischer Aluminium Verband (EAA) und Matter, 2011). Vergleicht man die Leistungsgewichte von Aluminium und Stahl, also den Quotienten aus der Dichte eines Werkstoffs und dessen Beanspruchbarkeit (analog zur Reißlänge), liegt der Werkstoff Aluminium auf einer Ebene mit höchstfesten Baustahl. Deshalb ist Aluminium für die Herstellung gewichtsoptimierter Tragstrukturen ein sehr interessanter Werkstoff. Ein Vergleich wesentlicher Materialeigenschaften zwischen Aluminium Baustahl und Edelstahl ist in Tabelle 2-3 dargestellt.

	Aluminium	niedriglegierter Stahl	hochlegierter Stahl
E-Modul E [N/mm ²]	70.000	210.000	≈200.000
Querdehnzahl μ [-]	0,345	0,27...0,3	0,27...0,3
Schubmodul G [N/mm ²]	26.000	81.000	79.000
Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	60...500	175...1.000	180...450
Festigkeit f_u [N/mm ²]	120...545	340...2.000	460...950
Bruchdehnung A_{10} [%]	8...15	21...26	35...45
Dichte ρ [g/cm ³]	2,7	7,8	7,9
Leistungsgewicht $\rho / R_{p0,2}$ [g/(cm×N)]	0,45...0,054	0,445...0,078	0,44...0,176
Wärmedehnung α_T [1/K]	$23,2 \times 10^{-6}$	12×10^{-6}	10×10^{-6}

Tabelle 2-3: Mechanische Kenngrößen verschiedener Metallerzeugnisse bei Raumtemperatur (Petersen, 1993; Kuchling, 2004; Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 4. Aufl. 2006; Hesse, 2007)

Die Steifigkeit und Dehngrenze von Aluminium sind temperaturabhängig. Dabei führen schon vergleichsweise geringe Temperaturerhöhungen zu Verschlechterungen der mechanischen Eigenschaften. Der E-Modul sowie die Dehngrenze verschiedener Aluminiumlegierungen in Abhängigkeit der Temperatur sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

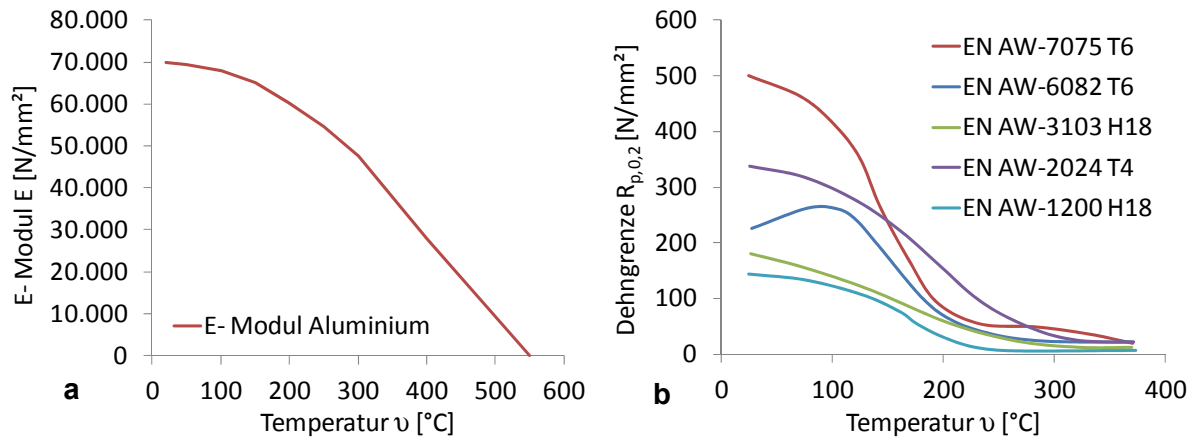


Abbildung 2.4: Temperaturabhängige Eigenschaften von Aluminiumwerkstoffen; a: E-Modul (Deutsches Institut für Normung, 2007); b: Dehngrenze $R_{p,0,2}$ (Europäischer Aluminium Verband (EAA) und Matter, 2011)

Aluminiumlegierungen weisen bei mechanischer Beanspruchung ein mehr oder weniger ausgeprägtes duktilen Verhalten auf. Bei atmosphärischen Einwirkungen bilden sie innerhalb kurzer Zeit eine Oxidoberfläche aus, die speziell adhäsive Eigenschaften maßgeblich beeinflusst (Kaesche, 1990; Valtinat, 2003; Dehn, et al., 2003; Hesse, 2007; Europäischer Aluminium Verband (EAA) und Matter, 2011).

Glas

Glas ist ein amorpher Werkstoff und besteht in seiner chemischen Zusammensetzung in reiner Form aus SiO_2 . Die amorphe Struktur des Glases führt zu optisch transparenten Eigenschaften, die das Glas im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts aufweist. Die mechanischen Eigenschaften von Glas sind bei Raumtemperatur durch ein nahezu ideal-elastisch-isotropes Materialverhalten gekennzeichnet. Daraus leitet sich ein sprödes Versagen ab, was insbesondere in Verbindung mit vorhandenen Oberflächendefekten zu verhältnismäßig geringen Zugfestigkeiten führt. Die Biegezugfestigkeit von Kalk-Natron-Glas kann im Experiment, abhängig von der Kantenqualität, mit Zugfestigkeiten f_u von $35 \text{ N/mm}^2 < f_u < 80 \text{ N/mm}^2$ bestimmt werden. Die atomaren Bindungen des SiO_2 sind sehr hoch, was besonders bei der Verwendung von Glas als Faserwerkstoff von besonderer Bedeutung ist. Die Zugfestigkeit von Glasfasern wird im Mittel mit $f_u \approx 1.800 \text{ N/mm}^2$ angegeben. Die Erhöhung der Festigkeit gegenüber dem Ausgangswerkstoff Glas liegt damit zwischen 2.250 und 5.100 % (Rose, 1977; Bergmeister, 2003). Abbildung 2.5 zeigt die Entwicklung der Zugfestigkeit von Glasfasern in Abhängigkeit vom Faserdurchmesser.

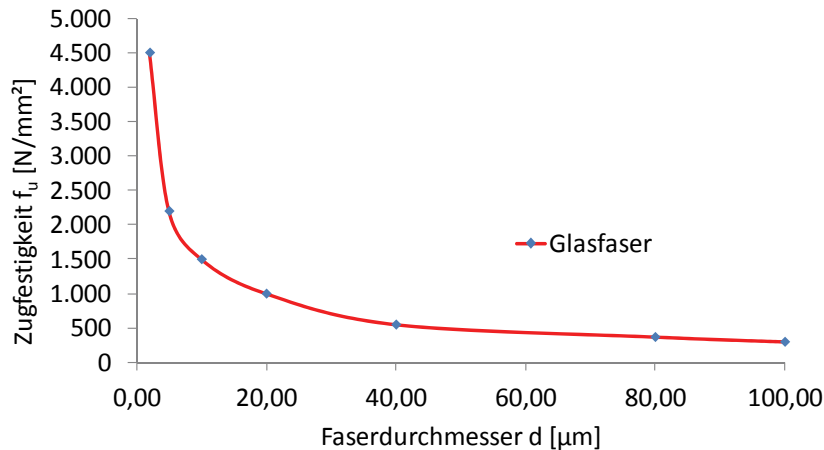


Abbildung 2.5: Auswirkung des Größeneffekts auf die Zugfestigkeit von Glasfasern (Griffith, 1920)

Die Oberflächeneigenschaften von Glas sind stark von dem jeweilig angewandten Herstellungs- bzw. Formgebungsprozess abhängig. Gläser, die mit dem häufig angewandten Floatprozess hergestellt werden, weisen auf der Zinnbadseite geringfügige Zinnspuren auf, wodurch die adhäsiven Eigenschaften der Glasoberfläche negativ beeinträchtigt werden (Graf, 2004).

2.2.3 Werkstoffkombination

Allgemeines

Für die Herstellung eines leistungsfähigen hybriden Systems stellt die sinnvolle Kombination von Ausgangswerkstoffen eine wesentliche Grundlage dar. Bei den hier betrachteten Hybridsystemen werden die in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Ausgangswerkstoffe verwendet. Eine Neuentwicklung spezieller Ausgangswerkstoffe ist nicht beabsichtigt. Die betrachteten:

- Klebstoff-Verbundwerkstoffe,
- Aluminium-Hybridelemente und
- Glas-Hybridsysteme

decken unterschiedliche Anwendungsbereiche ab und sollen bereits vorhandene Möglichkeiten des Bauwesens erweitern bzw. verbessern. Für die Herstellung von lastausgleichenden und redundanten Hybridsystemen können verschiedene Konstruktionsgrundsätze angewandt werden, die bei der grundlegenden Materialauswahl hilfreich sein können (Meier, 2002; Moro, et al., 2009; Weller, et al., 2010).

Für die Herstellung eines **lastausgleichend wirkenden Hybridsystems**, bestehend aus einem Hauptwerkstoff und einem Verstärkungswerkstoff, können ähnliche Konstruktionsgrundsätze aufgestellt werden, wie sie im Faserverbundbau Anwendung finden (Schürmann, 2007):

$$E_{\text{Verstärkungswerkstoff}} > E_{\text{Hauptwerkstoff}} \quad (2.3)$$

$$\epsilon_{\text{Bruch,Hauptwerkstoff}} > \epsilon_{\text{Bruch,Verstärkungswerkstoff}} \quad (2.4)$$

$$R_{\text{Verstärkungswerkstoff}} > R_{\text{Hauptwerkstoff}} \quad (2.5)$$

Durch Einhaltung dieser Konstruktionsgrundsätze ist gewährleistet, dass der als Systemverstärkung eingesetzte Werkstoff bei elastischer Beanspruchung einen wesentlichen Anteil des Lastabtrags realisiert. Die Gebrauchstauglichkeit des Hybridsystems wird dann durch beide Systembestandteile bestimmt. Mit der Einhaltung des Bruchdehnungskriteriums ist sichergestellt, dass der Verstärkungswerkstoff im Hybridsystem bis zu seiner Festigkeit f_u beansprucht werden kann.

Bei **redundant wirkenden Hybridsystemen** finden diese Konstruktionsgrundsätze keine Anwendung. Die Kriterien des Bruchverhaltens, wie z.B. Bruchdehnung und Nachbruchverhalten, sind hier von wesentlicher Bedeutung. In einem ausgewählten Anwendungsbeispiel kann das Tragverhalten eines redundant wirkenden strukturellen Hybridsystems skizziert werden. Als Hauptwerkstoff wird in diesem Fall der steifere Werkstoff definiert. Die Beschreibung des Tragverhaltens kann analog zum Stahlbetonbau in zwei Lastzustände untergliedert werden. Diese sind (Seim, 2007):

- Zustand 1: ungerissener Zustand,
 - Hauptwerkstoff und Verstärkungswerkstoff unterliegen keiner Schädigung,
 - Trageigenschaften werden weitgehend durch den Hauptwerkstoff generiert,
- Zustand 2: gerissener Zustand,
 - Hauptwerkstoff teilweise ausgefallen,
 - Trageigenschaften werden in Teilen durch den Haupt- und Verstärkungswerkstoff beeinflusst.

Die Voraussetzungen für das Erzielen eines redundanten Tragverhaltens lassen sich beschreiben mit:

$$\epsilon_{\text{Bruch,Hauptwerkstoff}} < \epsilon_{\text{Bruch,Verstärkungswerkstoff}} \quad (2.6)$$

$$R_{\text{Verstärkungswerkstoff}} > R_{\text{Hauptwerkstoff}} \quad (2.7)$$

Strukturelle Zusammenhänge

Unter Annahme eines starren Verbundes und eines ebenbleibenden Querschnitts können die Traglastanteile, die im Hybridsystem auf die einzelnen Werkstoffe abgeleitet werden, über deren Steifigkeiten bestimmt werden. Am Beispiel eines rein biegebeanspruchten Hybridquerschnitts mit zwei unterschiedlichen Werkstoffen A und B ist der Dehnungs- und Spannungszustand in Abbildung 2.6 dargestellt.

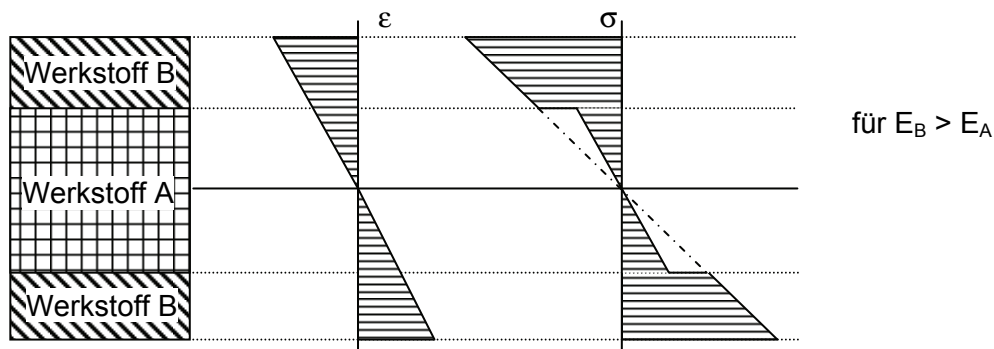


Abbildung 2.6: Ausbildung von Längsdehnung und -spannung eines zweikomponentigen, rein biegebeanspruchten Verbundquerschnitts

Für den Bereich des Werkstoffübergangs kann unter Annahme gleicher Dehnungen $\varepsilon_A = \varepsilon_B$ die Spannung in den jeweiligen Werkstoffen berechnet werden mit:

$$\sigma_B = \frac{E_B}{E_A} \times \sigma_A \quad (2.8)$$

Damit können einfache ingenieurmäßige Betrachtungen angewendet werden um den grundlegenden Beanspruchungszustand in einem hybriden Querschnitt zu beschreiben.

Spezielle Werkstoffkombinationen

Unter Berücksichtigung der Werkstoffeigenschaften kann eine Matrix aufgestellt werden, die Kombinationsmöglichkeiten für Hybridsysteme erfasst und hinsichtlich der Wirkungsweise der gewählten Verstärkungsform analysiert wird. Die Bewertungskriterien für eine derartige Matrix sind vom Anwendungsbereich des Hybridsystems abhängig. Für den Entwurf eines hybriden faserverstärkten Klebstoffs ist eine solche Matrix in Tabelle 2-4 dargestellt.

Verstärkung Haupt- werkstoff	keine Ver- stärkung	Glasfaser	Kohlenstoff- faser	Metallfaser	Polymerfaser
2K- Epoxidharz- klebstoff	⊕	⊕	⊕⊕	⊕	○
	⊕	⊕⊕	⊕⊕	⊕	⊕⊕
	○	⊖	⊖⊖	⊖	○
2K- Polyurethan- klebstoff	⊖	○	⊕	○	⊖
	○	⊕	⊕⊕	⊕	⊕⊕
	○	⊖	⊖⊖	⊖	○
Acrylatklebstoff	⊕	⊕	⊕⊕	⊕	○
	⊕	⊕⊕	⊕⊕	⊕	⊕⊕
	⊕⊕	⊕	○	⊕	⊕⊕

Tabelle 2-4: Matrix für zur Auswahl geeigneter faserverstärkter Klebstoffe mit Bewertungen für: **Steifigkeit E**; **Zugfestigkeit f_u** und **Schrumpfmaß V_s** (⊕ = hohes Schrumpfmaß)

Die einzelnen Faser-Klebstoff-Kombinationen weisen jeweils unterschiedliche Eigenschaften auf, die anhand der aufgestellten Matrix bewertet werden können. Hochmodulige Faserwerkstoffe steigern die Steifigkeit des Klebstoffs effektiver als niedermodulige Polymerfasern.

Für je ein lastausgleichend bzw. redundant wirkendes Hybridsystem sind unterschiedliche Werkstoffkombinationen, die hinsichtlich spezieller Kriterien bewertet werden, in Tabelle 2-5 dargestellt. Die Gewichtung der systemrelevanten Bewertungskriterien unterscheidet sich infolge der differenzierten Anforderungen von Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit.

Verstärkung Haupt- werkstoff	keine Verstärkung	GFK	CFK	polymerer Kunststoff (PC)	polymerer Kunststoff (PMMA)
Aluminium	⊕	⊕	⊕⊕	○	○
	⊕	⊕⊕	⊕⊕	○	○
	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
Glas	○	○	⊕⊕	○	○
	⊖⊖	⊕⊕	⊕⊕	⊕⊕	⊕
	⊖⊖	⊕	⊕	⊕⊕	⊕

Tabelle 2-5: Matrix für zur Auswahl geeigneter Verstärkungssysteme und deren Auswirkungen auf ein Hybridsystem mit Bewertungen für: **elastische Tragfähigkeit f_y** ; **plastische Tragreserven R_{pl}** und **Bauteilduktilität**

Bei dem lastausgleichend wirkenden Aluminium-Hybridsystem ist das Entwicklungsziel mit einer Steigerung der elastischen und plastischen Tragfähigkeit definiert. Eine Kombination von Aluminium und CFK stellt hier die Vorzugsvariante dar, die in bester Weise eine hohe elastische und plastische Tragfähigkeit ermöglicht.

Das Entwicklungsziel des Glas-Hybridsystems wird definiert durch die Anforderung nach einem transparenten System, das im Falle eines Glasbruches eine hohe Resttragfähigkeit aufweist. Die Resttragfähigkeit des Hybridsystems wird definiert über die Kriterien der plastischen Tragfähigkeit und Bauteilduktilität. Die konstruktive Anforderung der Transparenz stellt in dem Fall ein Ausschlusskriterium für die Anwendung opaker faserverstärkter Kunststoffe dar. Eine Kombination aus Glas und dem polymeren Kunststoff PC ermöglicht die Herstellung eines transparenten Tragwerks, das eine hohe Duktilität und Resttragfähigkeit aufzeigt. Die ebenfalls interessante Kombination von Glas und PMMA weist verglichen mit der Kombination von Glas und PC eine deutlich geringere Bauteilduktilität auf (vgl. dazu Abbildung 2.2, Steifigkeit und Duktilität verschiedener Kunststoffe). Damit stellt sich die Hybridvariante – Glas mit PC – aus den Vorbetrachtungen als Vorzugsvariante dar.

Ergebnisse der Materialauswahl

Grundlage für die Auswahl von sinnvollen Materialkombinationen, mit denen sich die in Abbildung 2.1 dargestellten Zielstellungen erfüllen lassen, bilden die in Tabelle 2-4 und Tabelle 2-5 aufgestellten Matrizen, die eine Bewertung möglicher Hybridsysteme hinsichtlich verschiedener Zielfunktionen beinhalten. Für jede der betrachteten Zielstellungen kann ein Materialverbund ermittelt werden, der eine optimale Kombination von positiven hybriden Eigenschaften aufweist. Diese sind untergliedert in:

- **Klebstoff mit erweiterten Anwendungsmöglichkeiten:**
 - Kombination aus 2K- Epoxidharzklebstoff und kurzgeschnittenen Kohlenstofffasern,
 - Steigerung der kohäsiven Eigenschaften, wie Steifigkeit und Zugfestigkeit,
 - Reduzierung des Schrumpfmaßes und der thermischen Dehnungen,
 - keine Beeinflussung der adhäsiven Eigenschaften,
 - Erweiterung des Anwendungsspektrums von Klebstoffen,
 - Herstellung eines **Klebstoff-Faser-Verbundwerkstoffes (KFV)**.

- Leichtmetall-Tragelement mit hoher gewichtsbezogener Tragfähigkeit:
 - Kombination aus einem hochfestem Aluminiumwerkstoff und unidirektional gerichteten CFK-Lamellen,
 - Steigerung der Gesamtsteifigkeit und elastischen und plastischen Tragfähigkeit,
 - Reduzierung bisher üblicher Bauteilmassen und Querschnittsabmessungen,
 - Montagefreundlichkeit der bisherigen Aluminiumtragelemente bleibt erhalten,
 - niedrige Dichte des CFK führt nur zu einer geringfügigen Erhöhung der Gesamtmasse des **Aluminium-CFK-Hybridelementes**.
- Glas-Hybridelement mit sicherheitsbedingt redundanten Trageigenschaften:
 - Kombination aus dem Werkstoff Glas und dem Kunststoff Polycarbonat,
 - Ausbildung eines duktilen Systemverhaltens mit nahezu vollständiger Redundanz,
 - ungeschädigter Zustand I: Werkstoff Glas übernimmt nahezu die komplette Tragwirkung, der Kunststoff stellt die strukturelle Kopplung zwischen den Glaselementen her,
 - geschädigter Zustand II: nach einem Glasbruch werden die internen Kräfte des Tragsystems vom Glas in den Kunststoff umgeleitet, und der Kunststoff übernimmt einen wesentlichen Teil der Lastabtragung, die Systemsteifigkeit nimmt schlagartig ab,
 - Steigerung der Sicherheit durch die Anordnung von Kunststoffelementen als Ausfallsicherung für das Glas und zur Herstellung einer Resttragfähigkeit in einem **Glas-Kunststoff-Hybridelement**.

Die Ergebnisse der Materialauswahl stellen die Grundlage der weiteren Untersuchungen dar, die in den Hauptabschnitten dieser Arbeit 3 bis 5 beschrieben sind.

2.2.4 Entwicklungsstand

Der Entwicklungsstand von Hybridsystemen hängt weitestgehend von der Verfügbarkeit der Ausgangswerkstoffe ab. Hybridsysteme aus Stahl und Beton sind daher wesentlich weiter verbreitet als geschichtlich gesehen jüngere Hybridsysteme aus Hochtechnologiefasern und Kunststoffen. In Deutschland ist die Anwendung von geregelten Bauprodukten eine Grundvoraussetzung für den Einsatz im öffentlichen Raum. Aufgrund der fehlenden Langzeiterfahrung besteht für viele neuartige Hybridsysteme die Auflage nach einer Regelung in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen oder Zustimmungen im Einzelfall. Diese Bestimmungen treffen auch auf die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Hybridsysteme zu. In den folgenden Abschnitten sind ausgewählte Veröffentlichungen und Patente zusammengestellt, die eine thematische Ähnlichkeit zu den im Rahmen dieser Arbeit schwerpunktmäßig untersuchten Themengebieten:

- Faserverstärkte Klebstoffe,
- Leichtmetall mit CFK,
- Glas mit Kunststoff,

aufweisen.

Faserverstärkte Klebstoffe

Spachtelmassen aus glasfaserverstärktem Epoxidharz werden seit den 80-er Jahren im Bootsbau zur Ausbesserung beschädigter Bauteile verwendet. Durch die Faserverstärkung wird das Schrumpfmaß infolge der Aushärtung begrenzt und eine Realisierung größerer Auftragsdicken ermöglicht. Die Spachtelmasse wird vorwiegend zur Ausbesserung von Rissen an schalenartigen Bauteilen verwendet. Die strukturelle Beanspruchung des glasfaserverstärkten Epoxidharzes ist relativ gering, in hochbeanspruchten Bereichen verleihen zusätz-

lich angeordnete Glasfasergewebematten der Bauteilausbesserung die notwendige Stabilität (Arbeitsgemeinschaft Schiffbau und Schiffsmaschinenbau, 1972).

Faserverstärkter Kunststoff wird als Spritzgusswerkstoff in vielfältigen Anwendungsbereichen eingesetzt. Als Kunststoff wird aus herstellungstechnischen Gründen meist ein Thermoplast wie z. B. Polypropylen verwendet. Die hohe Verarbeitungstemperatur des fließfähigen Spritzgusses führt zu einem großen Schrumpfmaß während der Abkühlung des Spritzgussbauteiles. Die Spritzgussoberfläche weist sehr geringe adhäsive Eigenschaften auf, was eine einfache Trennung des Kunststoffs von Spritzgusswerkzeug ermöglicht. Infolge des Spritzprozesses erhält der Spritzgusswerkstoff eine Anisotropie mit vorwiegend in Fließrichtung ausgerichteten Fasern (Johannaber, et al., 2004). Es wurden umfangreiche Patente auf Technologien des Spritzgießens, der Spritzgusswerkstoffe (meist Prepregs) sowie der benötigten Werkzeuge angemeldet (Hamabe, et al., 1995; Henn, 1998). Duroplastische Kunststoffe werden als Spritzguss für spezielle Anwendungsbereiche, die eine hohe Temperaturbeständigkeit und Formtreue erfordern, eingesetzt. Dabei werden ausschließlich warmhärtende duroplastische Kunststoffe verwendet (Johannaber, et al., 2004; Eyerer, et al., 2008).

In der Fertigung von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen besteht bisher eine Trennung zwischen der Herstellung faserverstärkter Bauteile und deren struktureller Kopplung untereinander (meist mit Klebverbindungen) (Aichele, et al., 1987; Hamada, 1991; Hamabe, et al., 1995; Füssinger, 1999).

Kalthärtende, faserverstärkte Klebstoffe werden gegenwärtig nicht in technischen Bereichen verwendet, bei denen der unausgehärtete Klebstoff, als Spritzgusswerkstoff, in den Bereich einer Verbindung zweier Bauteile eingetragen wird, um anschließend dort auszuhärten. In einer im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Veröffentlichung wird das Konzept eines faserverstärkten und mit Füllstoff angereicherten kalthärtenden Klebstoffs beschrieben. Anwendungsmöglichkeiten für diesen Werkstoff bestehen in der strukturellen Verbindung von Leichtmetall-Hohlprofilen für den Einsatz im Fassadenbau (Göbel, et al., 2009). Grundlegende Untersuchungen, die im Rahmen der Entwicklung und Anwendung dieser neuen Werkstoffgruppe erfolgten, werden im Abschnitt 3 dargestellt.

Leichtmetall mit CFK

Die Verbindung von Leichtmetallen mit Faserwerkstoffen ermöglicht die Herstellung sehr leichter und strukturell hochbeanspruchbarer Bauteile. Die Kombination von CFK-Werkstoffen und Leichtmetall, i. Allg. Aluminium und Magnesium, wird mit einer allgemeinen technischen Beschreibung mechanischer Eigenschaften im Patent von Akihiko Kitano dargestellt (Kitano, et al., 2007). In einem weiteren Patent wird die Rumpfkonstruktion eines Luft- oder Raumfahrzeuges in CFK-Metall-Hybridbauweise als Verbundtragwerk mit einem Metallrahmen beschrieben (Kolax, et al., 2008). Diese Konstruktionsform ist gekennzeichnet durch eine werkstoffgerechte Ausbildung, bei der geometrisch komplexe Bereiche und lochleistungsbeanspruchte Montagestellen mit Metallen gefertigt werden, die ein quasi-isotropes und duktilen Materialverhalten aufweisen. Vorwiegend ein- oder zweiachsig beanspruchte Bereiche mit geringen Spannungsgradienten werden hingegen mit CFK-Werkstoffen in Maten- oder Lamellenform ausgebildet.

Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe (MMC) basieren auf einem Ansatz, bei dem Faserverbundwerkstoffe als Kombination von Fasern und einer Leichtmetallmatrix hergestellt werden. Durch die im Vergleich zu Kunststoff hochsteife Matrix werden die Fasern bei Druckbeanspruchung sehr effektiv gegen ein Ausknicken stabilisiert. Die hohe Temperaturbeständigkeit der Metalle führt zu einem deutlich erweiterten Temperaturbereich, in dem der MMC einge-

setzt werden kann. Der Herstellungsprozess eines Metall-Matrix-Verbundwerkstoffes ist sehr komplex und wird von der Forderung bestimmt, dass die eingebrachten Fasern durch den geschmolzenen Metallwerkstoff nicht geschädigt oder in ihren Eigenschaften verändert werden dürfen. Bei der Herstellung von MMC, aus Borfasern und einer Aluminiummatrix, besteht die Anforderung nach der Einhaltung eines definierten Temperaturregimes, was ein Aufschmelzen der Legierungselemente des Aluminiums verhindert. Aufgeschmolzene Legierungselemente würden in diesem Fall zu einer Schädigung der Borfasern führen und die mechanischen Eigenschaften des MMC nachhaltig beeinträchtigen. Aufgrund der komplexen Fertigungssituation wird diese Faserverbundtechnologie aktuell vorwiegend bei Hi-Tech-Bauteilen der Automobilindustrie, z. B. der Herstellung von Kolben, Pleueln und Pleuellern, eingesetzt (Bräunling, 2004; Kalweit, et al., 2006; Degischer, et al., 2009; Trzesniowski, 2010).

Im Patent von Heinz Röder wird eine spezielle Anwendung von Verbundprofilen als Stützen- oder Riegelbauteil beschrieben, das aus einer Kombination von Leichtmetall- und Faserverbundwerkstoffen, wie z. B. Glas-, Kohlenstoff- oder Aramidfasern, besteht. Damit soll eine Reduzierung der Bauteilmassen, verglichen mit herkömmlichen monolithischen Leichtmetalltraglelementen, erreicht werden (Röder, 2001; Röder, 2010). In den Ausführungen der Patentschriften werden nur grundlegende technische und mechanische Zusammenhänge beschrieben, auf detaillierte Beschreibungen konstruktiver Ausbildungen möglicher Hybridsysteme wird dabei verzichtet. Im Rahmen dieser Arbeit werden Untersuchungen an Aluminium-CFK-Hybridelementen beschrieben, die eine Grundlage für den bautechnischen Einsatz dieser Elemente, einschließlich deren Bemessung darstellen. Diese Untersuchungen sind in Abschnitt 4 dargestellt und führten schließlich zur Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung von Alu-CFK-Hybridelementen zum Einsatz in Zeltkonstruktionen (DIBt, 2010).

Glas-Kunststoff

Die Kopplung von Glas und Kunststoff ermöglicht eine Konstruktion transparenter Bauteile, die bei mechanischer Überbeanspruchung des Glases nicht, für Glas typisch, schlagartig versagen, sondern eine definierte Resttragfähigkeit aufweist. Der Kunststoff übernimmt in diesem System die Funktion eines Sicherungselementes, das im Fall eines Glasbruches die freigesetzte Bruchenergie und auch statische Beanspruchungen temporär abtragen kann.

Ein Hauptanwendungsbereich der Glas-Kunststoff-Bauweise besteht in der Herstellung von beschuss- oder einbruchshemmenden Glaselementen. Patente und Veröffentlichungen beschreiben unterschiedliche Entwicklungsziele.

In den Patenten von Martin Schorning und Willis Center werden schwerpunktmäßig Glas-Kunststoff-Lamine beschrieben, die ein hohes Maß an Transparenz aufweisen. Unter Voraussetzung einer ähnlichen mechanischen Beanspruchbarkeit bei Objektanprall bietet die Ausbildung eines Glas-Kunststoff-Verbundes mit Layern aus Polycarbonat demnach ein höheres Maß an Transparenz, verglichen mit Glas-Kunststoff-Verbunden, bei denen PVB-Layer eingesetzt werden (Schorning, 2001; Center, et al., 2002). Der Beschusswiderstand ist bei Glas-Kunststoff-Scheiben im Wesentlichen abhängig von der Art des eingesetzten Kunststoffes. Der duktile Kunststoff Polycarbonat ist demnach besser für die Herstellung von Panzerglasscheiben geeignet als der spröde Kunststoff Polymethylmethacrylat (Lange, et al., 2001).

In einem Patent von Johann Neff wird das System einer Panzerglasscheibe in Verbindung mit dem Verfahren zu deren Herstellung beschrieben. Durch die Anordnung von Polycarbonatlagen an den Panzerglassaußenseiten kann ein verbesserter Splitterschutz erreicht

werden. Glasbruchstücke werden bei diesem System von der außenliegenden Polycarbonatschicht gebunden und vor einem Austreten in den zu schützenden Bereich zurückgehalten (Neff, 2005).

Im Fassadenbereich wird die Technik des Structural-Glazings mit linienförmig eingeklebten Glasscheiben eingesetzt, um raumabschließende Elemente mit einem hohen Maß an Transparenz herzustellen. Die Anwendung dieses Verfahrens ermöglicht die Ausnutzung der Schubsteifigkeit von Glasscheiben zur Herstellung hochsteifer Fassadensysteme mit einem hohen Glasanteil (Rice, et al., 1995; Köster, 2009).

Der Ansatz, teiltransparente Tragelemente aus Stahl und Kunststoff herzustellen, wurde von der Fa. Thyssen untersucht. Ziel war die Herstellung leichter I-Träger, die mit Edelstahlgurten und einem Steg aus Polycarbonat gefertigt werden. Die strukturelle Kopplung zwischen Gurt und Steg erfolgt durch das Einschieben des Kunststoffstegs in den Stahlgurt, der anschließend mechanisch umgeformt wird. Die geringe Schubfestigkeit der Stegeinbindung in den Gurt führt zu einer geringen Querkrafttragfähigkeit der Träger. Eine effiziente lastabtragende Anwendung dieser teiltransparenten Hybridelemente ist somit nicht möglich (Lemken, et al., 2008).

Eine vielversprechende Möglichkeit zur Herstellung vollständig transparenter Tragelemente aus Glas und Kunststoff wird in der Veröffentlichung von Frank Werner und Jörg Hildebrand beschrieben. Die Veröffentlichung bezieht sich auf die Konstruktion von doppelsymmetrischen Profilquerschnitten aus Glas und Kunststoff, die für die Herstellung einer tragenden Konstruktion verwendet werden können (Werner, et al., 2006). In einer weiteren Veröffentlichung werden Möglichkeiten des Einsatzes solcher Querschnittsformen in statisch beanspruchten Bauteilen dargestellt (Göbel, et al., 2009). Die Grundlagen dieses Glas-Kunststoff-Hybridsystems werden in Abschnitt 5 dargestellt.

2.3 Systemspezifische Anforderungen

2.3.1 Verbundbetrachtung

Bei den grundlegenden Betrachtungen ausgewählter Werkstoffkombinationen werden Einflüsse, die sich aus dem Verbund ergeben, zunächst nicht betrachtet. Allerdings können die mechanischen Eigenschaften der Ausgangswerkstoffe im Hybridsystem nur genutzt werden, wenn der Werkstoffverbund nicht als systemkritische Komponente ein Versagen des Hybridsystems initiiert (Meinz, et al., 2011). Daher stellt die Betrachtung der Verbundeigenschaften zwischen den Ausgangswerkstoffen im Hybridsystem einen wichtigen Teil der Entwicklungsarbeit dar, die für eine ganzheitliche Betrachtung des Hybridsystems erforderlich ist (Dehn, et al., 2003; Krenkel, 2009; Degischer, et al., 2009; Geiß, 2010; Adhäsion kleben & dichten, 2010; AVK, Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, 2010).

Die strukturelle Kopplung der Werkstoffe untereinander wird bei den hier betrachteten Hybridsystemen mit Klebverbindungen realisiert. Diese Form der Verbindung führt zu speziellen Beanspruchungen, die bei der Entwicklung der Hybridsysteme berücksichtigt werden müssen. Spezifische Anforderungen an den Verbund können untergliedert werden in (Zepf, 1997; Menges, et al., 2002; Ehrenstein, 2004; Grellemann, 2005; Brockmann, et al., 2005; Schürmann, 2007; Ehrenstein, et al., 2007; Schäfer, 2008; Bonnet, 2009; Meinz, et al., 2011):

- mechanische Beanspruchung der Verbindung,
- Temperaturbeständigkeit der zu verbindenden Substratoberflächen,
- Temperatureinwirkung im Gebrauchszustand,
- angreifende Medien und die
- Dauerhaftigkeit der Verbindung.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, muss die Klebverbindung spezielle Eigenschaften aufweisen. Diese könne beeinflusst werden mit (Schäfer, 2008; Geiß, 2010):

- Art und Beschaffenheit des Klebstoffs,
- (Klebstoffgerechte) Konstruktion und die
- Oberflächeneigenschaften der Substrate.

Grundlegende Betrachtungen zur Gestaltung geeigneter Klebverbindungen werden in den nachfolgenden Abschnitten geführt.

Klebstoffgerechtes Konstruieren

Die Konstruktion und geometrische Ausbildung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit einer Klebverbindung. Daher ist es bei Auslegung und Dimensionierung von strukturellen Klebverbindungen notwendig, die Klebfugenbeanspruchung optimal zu gestalten. Das beinhaltet vor allem die geometrische Dimensionierung in Abhängigkeit der Beanspruchung und wird unter dem Begriff „Klebstoffgerechte Konstruktion“ zusammengefasst.

Die Grundlagen des klebstoffgerechten Konstruierens werden in vielen Literaturstellen beschrieben (Lees, 1984; Altenbach, et al., 1996; Braess, et al., 2007; Schürmann, 2007; Adhäsion kleben & dichten, 2010; Geiß, 2010). Das Ziel bei der Gestaltung einer klebstoffgerechten Konstruktion ist ein Vermeiden von Beanspruchungen, die für die Klebverbindung ungünstig sind.

Es können im Wesentlichen drei unterschiedliche Beanspruchungsklassen gebildet werden (Ahlers-Hestermann, 2004; Braess, et al., 2007):

- Schälbeanspruchungen (ungünstig, geringe Beanspruchbarkeit),
 - Zugbeanspruchung normal zur Klebfläche mit lokaler Spitzenbeanspruchung; ist nicht zulässig und konstruktiv unbedingt zu vermeiden,
 - Klebverbindungen besitzen nur sehr geringe Widerstände gegenüber Schälbeanspruchungen.
- Normalkraftbeanspruchung in Zugrichtung (mittlere Beanspruchbarkeit),
 - Zugbeanspruchung normal zur Klebfläche ohne ausgeprägte Spitzenbeanspruchung,
 - Auslegung der Klebverbindung mit planmäßiger Normalkraftbeanspruchung ist zulässig,
 - Klebverbindungen besitzen mittlere Widerstände gegenüber Normalkraftbeanspruchungen.
- Schubbeanspruchung (günstig, hohe Beanspruchbarkeit),
 - Schubbeanspruchung parallel zur Klebfuge,
 - Klebverbindungen sind optimal für diese Verbindungskonfiguration geeignet,
 - Klebverbindungen besitzen hohe Widerstände gegenüber Schubbeanspruchungen.

Bei strukturellen Klebverbindungen ist eine klebstoffgerechte Konstruktion entscheidend für die Tragfähigkeit der Verbindung. Grundsätzlich gilt dabei, dass größere Klebflächen auch größere Beanspruchungen aufnehmen können. Weiterführende Anwendungsbeispiele für klebstoffgerechte Konstruktionen sind im Anhang in Abschnitt A.4.3 dargestellt.

Adhäsionsverbessernde Maßnahmen

Die Herstellung von strukturell tragfähigen Klebverbindungen stellt definierte Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit der zu verbindenden Werkstoffe. Generell müssen die Substratoberflächen vor der Benetzung mit Klebstoff trocken, staub- und fettfrei vorliegen. Bei metallischen Substraten ist sicherzustellen, dass die zu benetzenden Oberflächen frei von Rost und sonstigen Verunreinigungen oder Beschichtungen sind. Weiterhin muss die Oberflächenart bei der Wahl des zu verwendenden Klebstoffs berücksichtigt werden, um die generelle Eignung des Klebstoffs für die gewünschte Klebverbindung sicherzustellen. Als mechanische Oberflächenvorbehandlung kann oft ein Anschleifen der später zu benetzenden Oberflächen durchgeführt werden, um die wirksame Klebfläche durch eine erzeugte Rauigkeit zu vergrößern. Daneben gibt es eine Reihe weiterer hauptsächlich physikalischer Möglichkeiten der Oberflächenvorbereitung, die unterteilt werden können in (Brockmann, et al., 2005; Habenicht, 2009):

- physikalische Verfahren,
- physikalisch / thermische Verfahren und
- physikalisch / chemische Verfahren.

Von gereinigten Oberflächen geht eine sehr hohe Reaktivität aus. Daher sollten diese sofort nach dem Reinigungsvorgang dem Klebprozess zugeführt werden oder mithilfe von Haftvermittlern konserviert werden. Von besonderer Relevanz ist das für Kunststoffoberflächen, die im Vergleich zu metallischen Oberflächen eine vielfach höhere Oberflächenreaktivität besitzen (Beuschel, 1996; Pasternak, et al., 2003; Brockmann, et al., 2005; Pasternak, et al., 2007; Schürmann, 2007; Bode, 2009; Bode, et al., 2009; Göbel, et al., 2009; Dimmig-Osburg, et al., 2010; Adhäsion kleben & dichten, 2010). Weiterführende Betrachtungen zu den unterschiedlichen adhäsionsverbessernden Maßnahmen sind im Anhang in Abschnitt A.4.4 dargestellt.

2.3.2 Temperaturdehnungen / Bimetalleffekt

Die strukturelle Kopplung verschiedenartiger Werkstoffe mit unterschiedlichen Temperaturdehnungskoeffizienten führt bei Temperaturänderungen zu Zwängungen in der Verbundfuge, da die Dehnungen unter Ansatz des starren Verbundes direkt miteinander gekoppelt sind. Dieser Effekt wird im Bereich der Metalle auch als Bimetalleffekt bezeichnet (Flemming, et al., 2003). Unter dem Ansatz einer starren Kopplung stellt sich ein energetisches bzw. Kräftegleichgewicht ein. Die Dehnungsbehinderung führt zu Spannungen mit daraus resultierenden Kräften, die über die Verbundfuge zwischen den einzelnen Werkstoffen als Schubkraft eingetragen werden. Die Höhe der maximalen Beanspruchung in der Schubfuge ist im Wesentlichen abhängig von (Hagedorn, 2006):

- Geometrieparametern,
- den Steifigkeiten der einzelnen Werkstoffe,
- Unterschieden der Temperaturdehnungen und aufgetragenen Temperaturdifferenzen und
- der Elastizität der Verbundfuge.

Bei der Auslegung von Hybridsystemen ist es erforderlich, den Anwendungsbereich des Systems zu definieren. Insbesondere ist eine Definition des zu erwartenden Temperaturwechselbereichs notwendig, um Anforderungen an den Werkstoffverbund festlegen zu können (Brockmann, et al., 2005; Proske, et al., 2006; Habenicht, 2009; Adhäsion kleben & dichten, 2010).

Die Temperaturdehnungsdifferenzen innerhalb von Hybridsystemen beeinflussen auch die Auswahl möglicher Herstellungstechnologien. Warmaushärtende Klebstoffsysteme ($\nu_{\text{Aushärtung}} \approx 160 \dots 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$) zeigen besonders bei kompakten und steifen Bauteilen herstellungsbedingte Nachteile auf. Die während des Herstellungsvorgangs vorliegende Geometrie wird während des Fügevorgangs mit dem Beginn der Klebstoffaushärtung über eine starre Dehnungsbeziehung praktisch eingefroren. Unter Vernachlässigung zeitlicher Aspekte, wie Kriechen und Schwinden, kann dann eine grobe Abschätzung der Temperaturdehnungsdifferenzen, ausgehend von der Herstellungstemperatur, erfolgen. Daraus resultieren Schubbeanspruchungen in der Adhäsionsfuge, die numerisch dargestellt werden können. Für Bauteile, die normalen Temperaturbereichen $-20 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \nu < +80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ unterliegen, sind kalthärtende Klebstoffsysteme ($\nu_{\text{Aushärtung}} \approx 20 \dots 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$) im Vorteil, da die Temperatur zum Zeitpunkt der Aushärtung sich in der Mitte des zu erwartenden Temperaturwechselbereichs befindet (Dilthey, 2005; Geiß, 2006; Geiß, et al., 2007; Geiß, 2010).

Eine wirkungsvolle Möglichkeit der Reduzierung von Schubspannungsspitzen besteht in der Implementierung elastischer Zwischenschichten. Die Beanspruchungen können dann auf größere Bereiche umgelagert werden, womit eine Reduzierung der auftretenden Maximalspannung erzielt wird. Am Beispiel einer numerisch betrachteten Verbindung zwischen Stahl und Aluminium kann dieser Effekt verdeutlicht werden. Dazu werden unterschiedliche numerische Analysen mit unterschiedlichen Konfigurationen der Verbundfuge durchgeführt. Als Belastung wird für alle Modelle eine Temperaturwechselbeanspruchung von $\nu_0 = 20^{\circ}\text{C}$ auf $\nu_1 = 80^{\circ}\text{C}$ definiert. Abbildung 2.7 zeigt die Auswertung der berechneten Schubspannung in der Verbindungsfuge zwischen Stahl und Aluminium für verschiedene Verbindungskonfigurationen.

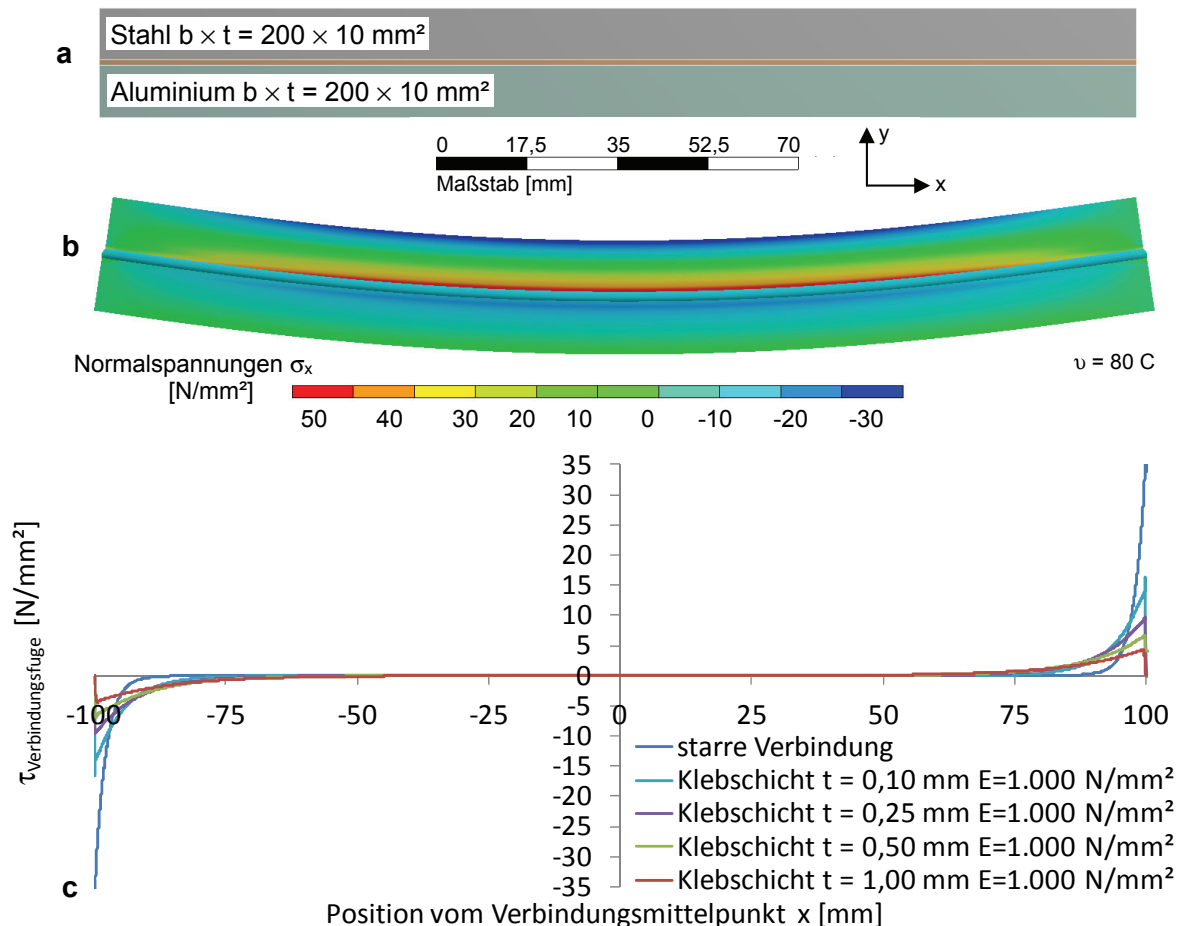


Abbildung 2.7: Ergebnisse der FEM-Analyse einer Klebverbindung zwischen Aluminium und Stahl unter Temperaturwechselbeanspruchung $\nu_0 = 20 \text{ °C} \Rightarrow \nu_1 = 80 \text{ °C}$; a: Geometriemodell einer Stahl- und Aluminiumplatte verbunden mit einer Klebschicht; b: berechnete Normalspannungen bei einer Klebschichtdicke $t = 1 \text{ mm}$; c: berechnete Schubspannungen in der Verbindungsfuge für unterschiedliche Verbundkonfigurationen

Die Analyse verdeutlicht, dass Temperaturdehnungen unterschiedlicher Materialien besonders in den Endbereichen von Klebverbindungen hohe Schubspannungen initiieren. Das kann bei ungeeigneter Auslegung der Verbindung zu Schädigungen und auch zur Entstehung von Rissen führen, die bei fortlaufender Belastung weiter wachsen. Dieser reiverschlussartige Effekt führt in einem solchen Fall zu einer vollständigen Zerstörung der Klebverbindung infolge Temperaturwechseleinwirkung. Daher ist insbesondere bei der Auslegung von Klebverbindungen in Hybridsystemen die Auswirkung unterschiedlicher Temperaturdehnungen zu berücksichtigen.

2.3.3 Alterung / Dauerbeanspruchung

Effekte aus Alterung und Wechselbeanspruchung müssen bei der ganzheitlichen Betrachtung von Hybridsystemen berücksichtigt werden, um eine bestimmungsgemäße Funktionsfähigkeit der im Hybridsystem angeordneten Systembestandteile gewährleisten zu können.

Kunststoffe, die bei der Herstellung von Hybridsystemen oft verwendet werden, unterliegen Alterungseffekten. Damit verändern sich im Laufe der Zeit ihre Eigenschaften. Das betrifft vor allem optische, elektrische und mechanische Eigenschaften (Wiese, 2010). Der Effekt des

Alterns von Kunststoffen wird beschleunigt durch dauerhafte Beanspruchungen der umgebenden Medien und kann zu einer Verminderung der mechanischen Widerstandsfähigkeit führen (Ahlers-Hestermann, 2004).

Weiterhin weisen Kunststoffe Kriecheigenschaften auf. Mechanische Beanspruchungen führen daher immer auch zu zeitabhängigen Verformungen, die in viskoelastische (reversible) und viskoplastische (irreversible) Anteile unterteilt werden können. Man spricht daher von einem Materialgedächtnis hinsichtlich der Vorbelastung bei Kunststoffen. Die Steifigkeit von Kunststoffen unter mechanischer Beanspruchung nimmt dabei mit fortschreitender Zeit ab (Herning, et al., 2007). Das Materialgedächtnis beschränkt sich im Wesentlichen auf ein Beanspruchungsniveau unterhalb der Maximalbeanspruchung, die auf den Kunststoff eingetragen wurde. Bei Klebstoffen tritt zusätzlich ein gegenläufiger Effekt infolge einer nachträglichen Aushärtung auf. Die Vernetzung innerhalb des Klebstoffpolymers nimmt im Verlauf der Zeit stetig zu, was zu einer Verbesserung der adhäsiven und kohäsiven Eigenschaften des Klebstoffs führt und steifigkeitserhöhend wirkt (Meier-Westhues, 2007).

2.3.4 Medienbeständigkeit

Angreifende Medien besitzen bei der Anwendung von Kunststoffen eine besondere Bedeutung. Insbesondere Wasserangriff, UV-Strahlung oder Diffusionsvorgänge führen bei vielen Kunststoffen langfristig zu einer Veränderung der Eigenschaften. Bei Lebensdaueranalysen eines Kunststoffbauteils ist es daher erforderlich, Betrachtungen über eventuell vorhandene aggressive Medien und deren Kontakt mit dem Bauteil zu führen (Bonten, 2002). Wenn die Möglichkeit besteht, Medienangriffe konstruktiv zu verhindern bzw. einzuschränken, so sollte dieser aktive Schutz vor Medienangriffen genutzt werden. Oft führen jedoch anwendungsspezifische Anforderungen dazu, dass ein Medienangriff nicht vollständig auszuschließen ist. (Weber, 1994; Grellemann, 2005).

Wasserangriff

Der Wasserangriff stellt für Kunststoffbauteile einen wesentlichen Beanspruchungszustand dar. Der direkte Kontakt von Kunststoffen mit Wasser führt zu zweistufigen Beanspruchungssituationen die beschrieben werden kann mit (Michaeli, et al., 1995):

- dem chemischer Angriff von H_2O , H_3O^+ und Diffusionsvorgängen, insbesondere von Wasserstoff,
- Partikel, die im Wasser transportiert werden, ermöglichen den Elektronenfluss, Kontaktkorrosion usw.

Wasserangriff führt bei Klebverbindungen oft zu Schädigungen. Insbesondere Acrylatklebstoffe sind gegenüber Wasserangriff sehr anfällig und verlieren stark an Festigkeit. Die Adhäsionsbindung wird innerhalb der Klebverbindung durch das Wasser geschädigt und fällt schließlich aus. Daher ist ein direkter Wasserangriff auf Kunststoffe, insbesondere auf Klebverbindungen, nach Möglichkeit konstruktiv zu verhindern.

Kontaktkorrosion

Kontaktkorrosion oder auch Bimetallkorrosion tritt bei der elektrischen Verbindung zweier Bauteile mit unterschiedlichem Standardpotential E° auf. Der Werkstoff mit dem geringeren Standardpotential wirkt dabei als Anode und oxidiert, wohingegen der Werkstoff mit dem höheren Standardpotential reduziert wird. In der Folge entstehen Schädigungen am Bauteil, die optische und mechanische Veränderungen hervorrufen können (Kaesche, 1990).

Eine Möglichkeit zur Unterbindung oder Verlangsamung der Kontaktkorrosion besteht in der Positionierung eines Dielektrikums (nichtleitende, nichtmetallische Schicht) zwischen den elektrischen Leitern mit unterschiedlichem Standardpotential. Damit werden die unterschiedlichen Werkstoffe elektrisch voneinander isoliert, und ein Stromfluss, der zu Korrosion der Anode führt, wird behindert. Kunststoffe und Klebstoffe stellen, eine entsprechende Schichtdicke vorausgesetzt, eine isolierende Wirkung her. Es ist jedoch zu beachten, dass Kontaktkorrosion niemals vollständig verhindert, sondern nur in ihrer Geschwindigkeit stark verlangsamt werden kann (Wendler-Kalsch, et al., 1998).

UV-Einwirkungen

UV-Einwirkungen führen durch die eingetragene Strahlungsenergie in Kunststoffen ebenfalls zur Veränderung der optischen und mechanischen Eigenschaften. Visuell können diese Veränderungen meist durch eine Farbveränderung erkannt werden. Abbildung 2.8 zeigt die Auswirkungen einer mittels Suntest ausgeführten UV-Bestrahlung auf eine Epoxidharz-Kleboverbindung. Der ursprünglich transparente Charakter der Verbindung ändert sich im Laufe der Beanspruchung zu einer transluzenten Kleboverbindung mit Gelbfärbung. Der ursprünglich beabsichtigte Effekt einer durchgängig lichtdurchlässigen Verbindung wird damit gestört. UV-Einwirkungen führen auch zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften von Bauteilen und Verbindungen. Das führt oft zu einer Versprödung des Kunststoffes und zu einer starken Verringerung der Festigkeit (Menges, et al., 2002; Baur, et al., 2007).

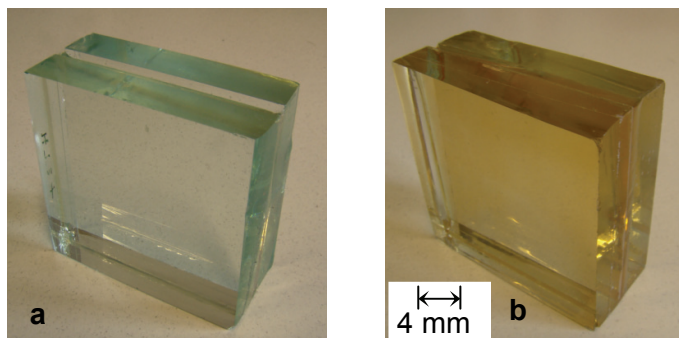


Abbildung 2.8: Auswirkung von UV-Einstrahlung auf eine Epoxid-Gießharzkleboverbindung
a: vor UV-Bestrahlung; b: nach 72 h Sunttest

Die UV-Einwirkung kann meist durch spezielle, nicht im Bereich des sichtbaren Lichts liegende Filter in ihren Auswirkungen auf Kunststoffbauteile abgeschwächt werden. Hierzu laufen intensive Forschungsarbeiten mit dem Ziel, den Anwendungsbereich der Kunst- und Klebstoffe zukünftig erweitern zu können (Baur, et al., 2007; Bonnet, 2009).

2.3.5 Herstellungstechnologien

Die Konzeption und Entwicklung einer robusten Herstellungstechnologie bildet die Grundlage des industriellen Einsatzes neuartiger Hybridsysteme im Bauwesen (Krenkel, 2009). Die Anforderungen an eine Herstellungstechnologie untergliedern sich in (Eversheim, et al., 2005):

- robuste, fehlertolerante Anwendung,
- hoher Automatisierungsgrad,
- gleichbleibend hohe Fertigungsqualität,
- Kontrollmöglichkeit der Fertigungsqualität,
- Arbeitsschutzbestimmungen und
- ökologische und wirtschaftliche Randbedingungen.

Die Herstellungstechnologie ist auf spezifische Anforderungen eines Hybridsystems abzustimmen. Eine Konzeption von industriell einsetzbaren Herstellungstechnologien ist nicht Schwerpunkt dieser Abhandlung und wird für die untersuchten Hybridsysteme nur in Ansätzen dargestellt.

2.4 Synthesemethoden der numerischen und experimentellen Analyse

2.4.1 Einleitung

Für die Untersuchung neuartiger struktureller Hybridsysteme stehen umfangreiche Synthesemethoden zur Verfügung. Bei den im Rahmen dieser Arbeit betrachtenden Hybridsystemen wird eine Kombination aus:

- analytischen,
- numerischen mittels FEM und
- experimentellen Untersuchungen

angewandt (Bathe, 2002; Bonten, 2002; Gutierrez, 2005; Meinz, et al., 2011). Die Modellbildung stellt ein wesentliches Werkzeug der Analyse dar und ermöglicht es, Systemzusammenhänge innerhalb von Hybridsystemen qualitativ und quantitativ zu erfassen (Bungartz, et al., 2009). Die Untersuchungen erfolgen unter der Zielstellung, eine ganzheitliche Betrachtung der ausgewählten Hybridsysteme zu ermöglichen.

Analysen in unterschiedlichen Skalenbereichen ermöglichen eine anschauliche Darstellung von Systemzusammenhängen. Durch das Gegenüberstellen numerischer und experimenteller Aussagen ist es möglich, numerische Eingangsgrößen zu kalibrieren und angenommene Systemzusammenhänge zu validieren. Eine Unterteilung kann dabei in folgende Skalierung getroffen werden (Sommitsch, 2010):

- atomare Ebene,
 - ausschließlich theoretische Betrachtungen,
 - mathematische Analysen physikalischer Zusammenhänge,
- Nanoebene,
 - hauptsächlich theoretische Betrachtungen,
 - experimentelle Messungen nur indirekt möglich,
- Mikroebene,
 - Betrachtung großer Molekülgruppen, einzelner Fasern, Kristalle usw.,
 - Betrachtungsbereich für bruchmechanische Untersuchungen,
 - phänomenologische Betrachtung mit REM möglich,
- Mesoebene,
 - phänomenologische Betrachtungsebene im Bereich des Lichtmikroskops,
 - Detailbetrachtungen zu Adhäsionsbeanspruchungen mittels FEM
- Makroebene,
 - Betrachtung von räumlich größeren Modellen,
 - freisichtige Betrachtung möglich.

Auf eine Betrachtung im atomaren und Nanoebenenbereich wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

Bei Untersuchungen im Mikrobereich werden Systemzusammenhänge im Auflösungsbereich kleinerer Partikel und einzelner Fasern betrachtet. Das dabei zu untersuchende System besteht üblicherweise aus zwei oder mehr Phasen. Zwischen den Phasen bestehen Kopplun-

gen in Form adhäsiver Verbindungen. Analysen im Mikroskalenbereich erweisen sich oftmals als komplex. Daher ist es meist notwendig, diese auf einen lokalen Bereich zu begrenzen. Beobachtungen in Mikroebene ermöglichen es, Aussagen über bestimmte Systemzusammenhänge zu treffen, die Einflüsse auf Systemreaktionen im Mesoskalenbereich ausüben.

Untersuchungen im Meso- und Makrobereich erlauben eine Betrachtung größerer zusammenhängender Strukturen mit definierten Randbedingungen. Die Werkstoffe werden im Verbund als homogene Körper mit entsprechend isotropen oder anisotropen Materialeigenschaften betrachtet. Lokale Effekte, die im Mikro- und Mesobereich berücksichtigt werden können, werden im Makroskalenbereich vernachlässigt und zu quasi globale Materialeigenschaften verschmiert. Erkenntnisse, die aus den Betrachtungen an Meso- und Makromodellen erzielt werden, können wiederum als Randbedingungen für Mikromodelle eingesetzt werden (Bullinger, 2007; Sommitsch, 2010).

2.4.2 Analytische Betrachtungen

Analytische Betrachtungen stellen ein grundlegendes ingenieurmäßiges Werkzeug zur anschaulichen Modellbildung dar. Theoretisch mathematische Überlegungen ermöglichen der Mechanik und Statik, Modelle zu entwickeln, die Systeme und Randbedingungen in der Ingenieurwissenschaft darstellen können. Bei der Herleitung von Bemessungsansätzen, die z. B. im Rahmen von bauaufsichtlichen Zulassungen für die Anwendung neuer, nicht geregelter Bauprodukte erforderlich sind, stellen analytische Betrachtungen eine Möglichkeit dar, Systeme einfach und weitestgehend einheitlich übertragbar zu beschreiben. Daneben können wahrscheinlichkeitstheoretische Verfahren, wie z. B. die Monte-Carlo-Simulation für die Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit komplexer Hybridsysteme angewandt werden (Pfyl, 2003; Weller, et al., 2010; Pasternak, et al., 2012).

Bei der grundlegenden statischen Untersuchung von Hybridsystemen, deren strukturellen Bestandteile starr miteinander verbunden sind, besteht die Möglichkeit einer Betrachtung am ebenen Querschnitt. Mit zunehmender Komplexität des Modells, insbesondere bei Annahme eines elastischen oder nichtlinearen Verbundes, steigt die mathematische Komplexität jedoch ebenfalls stark an. Das führt bei sehr umfangreichen Modellen, besonders in Detailbetrachtungen, zu komplexen mathematischen Zusammenhängen, die nicht trivial lösbar sind. Dabei verlieren analytische Betrachtungen stark an Anschaulichkeit und werden daher bei komplexen Problemstellungen oft durch numerische Betrachtungen ersetzt (Straub, 1996; Engeln-Müllges, et al., 2011; Pasternak, et al., 2012).

2.4.3 Numerische Betrachtung mittels FEM

Die numerische Abbildung erlaubt eine konsequente Weiterentwicklung der betrachteten Hybridsysteme, da Systemzusammenhänge auch in messtechnisch schwer zugänglichen Bereichen detailliert analysiert werden können. Die Ergebnisqualität ist dabei im Wesentlichen abhängig von der Qualität der verwendeten Partialmodelle, die in der Gesamtheit der Abbildung das betrachtete Modell ergeben. Numerische Betrachtungen können in einem sehr weiten Aufgabenbereich geführt werden. Dazu gehören u. a. Strömungssimulationen, Magnetfeldsimulationen und thermisch-mechanische Simulationen (Bathe, 2002). Die unterschiedlichen numerischen Modelle sind nahezu beliebig untereinander koppelbar, wodurch sich umfangreiche Interaktionsmöglichkeiten ergeben. So ist es z. B. möglich, die Ergebnisse einer thermischen Simulation auf ein mechanisches Modell zu übertragen und als Randbedingung in einer mechanischen Simulation zu verwenden. Eine weitere Variante besteht in der Kopplung einer strömungsmechanischen Analyse mit einem mechanischen Modell, in

dem das Ergebnis der strömungsmechanischen Analyse als Randbedingung für das mechanische Modell eingesetzt wird (Groth, 2007).

Bei der mechanischen Formulierung mittels finiten Elementen ist zu beachten, dass für jedes differentielle Element ein Gleichgewicht zwischen inneren und äußeren Beanspruchungen bestehen muss. Damit gilt (Bathe, 2002):

$$W = \int_V \sigma \varepsilon - \int_V p u \, dV = 0, \quad (2.9)$$

mit $\sigma \varepsilon$ Spannung und Dehnung (innerer Energieanteil),

$p u$ Belastung und Verschiebung (äußerer Energieanteil).

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten numerischen Analysen wurde das FEM-System ANSYS verwendet. Dabei wurden im Wesentlichen Schalen- und Volumenelementkörper mit quadratischer Ansatzfunktion verwendet. Abbildung 2.9 zeigt die Grundformen der verwendeten Elementtypen mit Darstellung der in den Elementen enthaltenen Knoten.

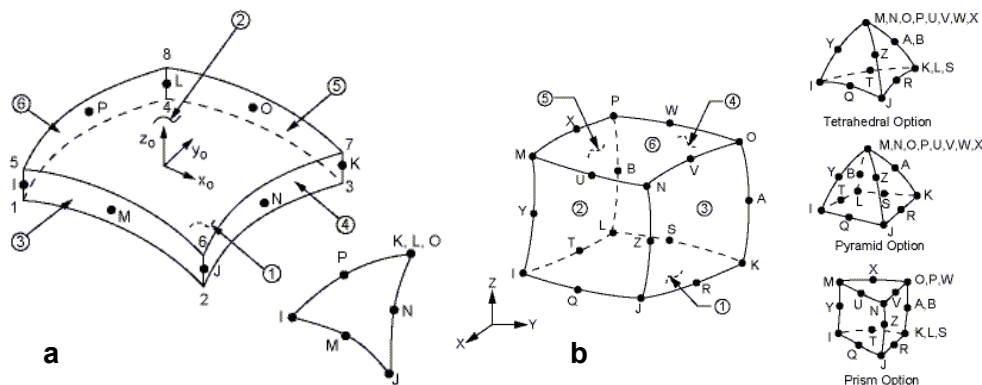


Abbildung 2.9: Elementarten für die Verwendung in FEM-Analysen (SAS IP, Inc., 2010); a: Schalenelemente; b: Volumenelemente

Mittels dieser Elemente ist es möglich die unterschiedlichen Materialien in einem Verbundwerkstoff oder -system zu modellieren und Verbundbetrachtungen innerhalb von komplexen Systemen zu führen.

Um eine FE-Simulation für ein Bauteil durchführen zu können, muss das Materialverhalten eines Werkstoffes in einer für diese Methode geeigneten Art und Weise definiert werden. Die Basis sind mathematische Formulierungen, die den Zusammenhang zwischen Spannung, Dehnung, Zeit und Temperatur in Abhängigkeit bestimmter werkstoffspezifischer Materialparameter beschreiben. Solche Formulierungen bezeichnet man als Stoff- oder Materialgesetz bzw. Materialmodell (Bathe, 2002; Mang, et al., 2004).

Bei der Entwicklung von Materialmodellen muss stets ein Kompromiss zwischen Aufwand und Ergebnisqualität gefunden werden. Je detaillierter man ein Modell an ein reales Werkstoffverhalten annähern will, desto umfangreicher wird dessen mathematische Formulierung. Dadurch wird die Definition von entsprechenden Modellparametern wesentlich komplexer. Der Detailgrad eines Materialmodells sollte dabei immer auf den Detaillierungsgrad des Gesamtmodells abgestimmt sein. Aus diesem Grund beschränken sich Materialmodelle oft nur auf bestimmte Randbedingungen, z. B. kleine Dehnungen, nahezu konstante Spannungen oder kurzzeitige Belastungen. Verwendet man ein bestimmtes Materialmodell, so müssen die entsprechenden Einschränkungen des Gültigkeitsbereiches beachtet werden, um sinnvolle Berechnungsergebnisse zu erhalten (Bathe, 2002; Eyerer, et al., 2008).

Nahezu alle realen Stoffe weisen, wenn auch in unterschiedlichem Maße, sämtliche rheologischen Grundeigenschaften wie Elastizität, Plastizität und Viskosität auf. Kommt es beispielsweise zu einer Deformation, so lassen sich sowohl elastische, plastische als auch viskose Deformationsanteile erkennen, die in der Rheologie durch entsprechende Grundelemente repräsentiert werden. Dabei wird das Verhältnis der verschiedenen Anteile maßgeblich durch die Materialstruktur festgelegt. In der Kontinuumsmechanik haben rheologische Modelle eine breite Anwendung bei der Formulierung von Zustandsgleichungen gefunden. Der Leitgedanke besteht dabei in einer phänomenologischen Formulierung von Materialgleichungen für Grundelemente, auf deren Basis ein reales Materialverhalten durch Zusammenschalten verschiedener Grundkörper approximiert wird (Bathe, 2002).

Die Gesamtdehnung in einem Körper setzt sich zusammen aus (Bathe, 2002):

$$\epsilon^{\text{ges}} = \epsilon^{\text{elast}} + \epsilon^{\text{plast}} + \epsilon^{\text{visko}} + \epsilon^{\text{therm}} + \epsilon^{\text{chem}}, \quad (2.10)$$

mit ϵ^{elast} elastische Dehnung,

ϵ^{plast} plastische Dehnung,

ϵ^{visko} viskose Dehnung,

ϵ^{therm} Wärmedehnung

ϵ^{chem} chemische Umwandlungsdehnungen.

Weiterführende Informationen zu ausgewählten mechanischen Materialmodellen und den darin enthaltenen rheologischen Grundelementen sind im Anhang in Abschnitt A.1 dargestellt. Analog zu den Materialeigenschaften kann das Adhäsionsversagen von Klebverbindungen z. B. mit einer exponentiellen Ansatzfunktion beschrieben werden. Dabei ist die Fuge, in der das Versagen auftritt, als Eingangsgröße des Modells vorzugeben. Die Beschreibung eines Adhäsions-Kohäsions-Mischversagens ist dementsprechend nicht möglich (Xu, 1994). Eine detaillierte Darstellung der mathematischen Formulierung des Adhäsions-schichtversagens erfolgt in Abschnitt A.1.5 des Anhangs. Nichtlineare Effekte, die z. B. durch das Auftreten großer Verformungen oder lokaler Dehnungen entstehen, können in den gängigen FEM-Programmen berücksichtigt werden. Damit ist es möglich, zwischen Ingenieur- bzw. Nominalspannungen am unverformten Modell und realen Spannungen am verformten Bauteil zu unterscheiden. Eine weiterführende Beschreibung zu nominellen und realen Spannungen bzw. Dehnungen erfolgt in Abschnitt A.1.6 des Anhangs.

Für die Anpassung und Optimierung von Bauteilen und -systemen können numerische Verfahren und genetische Algorithmen verwendet werden. Dabei sind verschiedenartige Entwicklungsziele zu definieren und spezielle Einflüsse aus dem System herausgelöst zu betrachten (Gerdes, et al., 2004; Schilling, 2004). Auf eine Anwendung dieser Verfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da sie für die hier betrachteten Problemstellungen, hauptsächlich der Optimierung des Verbundes, nur bedingt anwendbar sind.

2.4.4 Experimentelle Betrachtungen

Ein Schwerpunkt der experimentellen Betrachtungen liegt in der Untersuchung wesentlicher Kenngrößen von Werkstoffen bzw. Materialien. In einfachen Versuchen, z. B. in Zugversuchen, können experimentelle Daten ermittelt werden, die über eine analytische Auswertung die Bestimmung geeigneter Materialmodelle erlauben (Michaeli, et al., 1995; Graf, et al., 2006).

Bei Neuentwicklungen von strukturellen Hybridsystemen, die im Bauwesen eingesetzt werden sollen, besteht immer das Defizit einer fehlenden Langzeiterfahrung (Bonnet, 2009). Mittels experimenteller Untersuchungen ist es jedoch zumindest modellhaft möglich, Langzeiteinwirkungen aus klimatischen oder strukturellen Einflüssen für ein Bauteil darzustellen. Ziel dieser Untersuchungen ist es, Aussagen über die Dauerhaftigkeit der untersuchten Systeme unter definierten Randbedingungen zu erhalten. Dazu werden die Auswirkungen möglicher Beanspruchungszustände im Zeitrafferverfahren analysiert (Ehrenstein, et al., 2007). Die verwendeten Analysemethoden werden unterteilt in:

- strukturelle Belastungen;
 - einaxiale Zugversuche, Kriechversuche, Bestimmung von Materialeigenschaften,
 - Verbunduntersuchungen an Klebverbindungen,
 - dynamische Lasteinwirkungen, Ermüdungsuntersuchungen,
 - hohe statische Dauerlasten.
- Umweltbelastungen;
 - dynamische Temperaturwechselbeanspruchungen,
 - Salzangriff, Kochtest,
 - UV-Einwirkungen, Suntest.

Experimentelle Betrachtungen ermöglichen die Validierung und Verifizierung numerischer Modelle und stellen somit eine wesentliche Grundlage für die Bewertung der Modellqualität der verwendeten FEM-Modelle dar. Es ist zu beachten, dass eine experimentelle Betrachtung immer auch modellhafte Abbildungen mit einbezieht, bei der alle Randbedingungen mit erfasst werden müssen (Kromidas, 2011).

2.5 Weitere Entwicklung

2.5.1 Entwicklungsschwerpunkte dieser Arbeit

Die im Rahmen dieser Arbeit schwerpunktmäßig betrachteten:

- Klebstoff-Faser-Verbundwerkstoffe,
- Alu-CFK-Hybridelemente und
- Glas-Kunststoff-Hybridelemente

werden in den Abschnitten 3 bis 5 in ihrer Funktionsweise und den zugrundeliegenden mechanischen Zusammenhängen erläutert.

Für die Untersuchungen werden analytische, numerische und experimentelle Analyseverfahren angewandt. Bei den numerischen Analysen wird hauptsächlich die Methode der finiten Elemente verwendet. Die Untersuchungen sollen als Grundlage einer späteren Bemessung der Hybridsysteme für deren baupraktische Anwendung dienen.

2.5.2 Bemessung von Klebverbindungen

Klebverbindungen, die als strukturelle Fügetechnologie in bautechnischen Belangen eingesetzt werden sollen, unterliegen gegenwärtig vielmals der Auflage einer allgemeinen bautechnischen Zulassung oder der Zustimmung im Einzelfall. Damit wird das Anwendungsspektrum solcher Verbindungen im Bauwesen stark eingeschränkt. Über die im Eurocode bestehende Möglichkeit einer versuchsgestützten Bemessung können anhand repräsentativer Versuchsergebnisse Versagenswahrscheinlichkeiten derartiger Verbindungen berechnet werden. Damit kann, unter der Voraussetzung das ein genaues Anforderungsprofil der zu

bemessenden Verbindung vorliegt, eine wirtschaftliche Bemessung erzielt werden. Bei Klebverbindungen betrifft das vor allem die Definition zu erwartender Temperaturen und Dauerlasten. Durch Untersuchungen der TU-Cottbus ist anhand von Klebverbindungen im Stahlbau gezeigt worden dass die Bemessung von strukturellen Klebungen im Stahlbau anhand eines versuchsgestützten Konzeptes erfolgen kann (Meinz, 2010; Meinz, et al., 2011; Pasternak, et al., 2012). Daneben bieten probabilistische Verfahren, wie z. B. die Monte-Carlo-Simulation eine Möglichkeit, Aussagegenauigkeiten von versuchsgestützten Bemessungen zu erhöhen.

3 Klebstoff-Faser-Verbundwerkstoffe

Faserverstärkte Klebstoffe stellen lastabtragende Hybridwerkstoffe dar, die in unterschiedlichen Anwendungsbereichen des Bauwesens eingesetzt werden können. Der durch die Faserverstärkung entstehende Hybridwerkstoff weist neben seinen adhäsiven Eigenschaften zusätzlich verbesserte kohäsive Eigenschaften, insbesondere eine erhöhte Zugfestigkeit, auf. Durch die Faserverstärkung besteht somit die Möglichkeit, Anwendungsbereiche, die einfache Klebstoffe heute schon abdecken, zu erweitern.

3.1 Grundlagen

In den Abschnitten 3.1.1 bis 3.1.7 werden grundlegende Betrachtungen an faser- und faserpatikel-verstärkten KVF dargestellt. Es werden die mechanischen Zusammenhänge analysiert und für verschiedene KVF-Systeme unter definierten Randbedingungen Wechselwirkungen in unterschiedlichen Betrachtungsskalen von Mikro- bis Makroebene analysiert.

3.1.1 Einleitung

Herkömmliche Klebstoffe werden aktuell hauptsächlich für Dünnschichtklebungen mit Schichtdicken $t \leq 5$ mm eingesetzt. Die chemische Zusammensetzung und der atomare Aufbau der Klebstoffe führen i. Allg. zu guten Adhäsionsbindungen des Klebstoffs mit einer zu benetzenden Substratoberfläche. Klebstoffe sind damit hervorragend geeignet, um verschiedene Objekte miteinander zu verbinden. Bei größeren Klebschichtdicken führt die geringe Steifigkeit und innere Festigkeit des Klebstoffs zu einem mechanisch ungünstigen Materialverhalten. Klebverbindungen, die große Klebschichtdicken beinhalten, weisen i.d.R. ein ungünstiges Tragverhalten auf. Bei der Entwicklung faserverstärkter Klebstoffe liegt der Schwerpunkt in der Verbesserung der kohäsiven Materialeigenschaften. Die Steifigkeit und innere Festigkeit sollen erhöht werden, bei gleichzeitiger Beibehaltung der adhäsiven Eigenschaften (Werner, et al., 2008).

Faserverstärkte Klebstoffsysteme befinden sich derzeit noch in der Entwicklung. Gegenüber herkömmlichen faserverstärkten Kunststoffen bieten auf Klebstoff basierende Faser-Matrix-Systeme den Vorteil, dass sie adhäsive Bindungen zu anderen Bauteilen aufbauen können. Klebstoff-Faser-Verbundwerkstoffe können mit ihren guten kohäsiven und adhäsiven Eigenschaften als Bauteilverstärkung oder Verbindungsmittel eingesetzt werden. In einem AIF-Forschungsprojekt der Bauhaus-Universität Weimar wurden faserverstärkte Klebstoffsysteme hinsichtlich ihrer Eignung als lastabtragendes Verbindungselement für Fassadenelemente untersucht (Werner, 2008). Für die Herstellung der hier betrachteten faserverstärkten Klebstoffsysteme werden ausschließlich Kurzschnittfasern mit einer durchschnittlichen Länge von $50 \mu\text{m} < L < 10 \text{ mm}$ verwendet. Die Fasern sind im Klebstoff räumlich stochastisch verteilt angeordnet. Abbildung 3.1 zeigt die Faserverteilung und deren Ausrichtung an der Oberfläche eines faserverstärkten Klebstoffsystems.

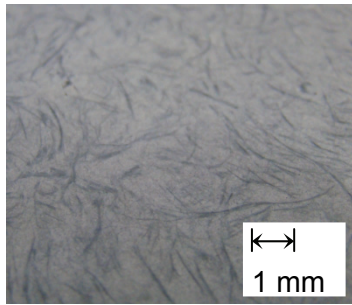


Abbildung 3.1: Oberfläche eines multiaxial gerichteten Klebstoff-Faser-Verbundwerkstoffs

Im ausgehärteten Zustand entsteht so ein isotrop mechanisches Materialverhalten. Je nach Verarbeitungsverfahren kann diese Isotropie auch in eine Anisotropie gewandelt werden, da sich die Ausrichtung der Fasern in der Matrix durch Verarbeitungsvorgänge beeinflussen lässt (Werner, 2008).

3.1.2 Ingenieurmäßige Betrachtung

Die mechanischen Eigenschaften eines Klebstoff-Faser-Verbundwerkstoffs werden im Wesentlichen durch die kohäsiven Eigenschaften der Ausgangswerkstoffe:

- Klebstoff und
- Fasern

bestimmt. Die Faserorientierung übt einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften eines Faserverbundsystems aus.

Es wird unterschieden zwischen:

- unidirektionaler Faserorientierung,
- bidirektionaler Faserorientierung und
- quasi-isotroper Faserorientierung.

Eine ingenieurmäßige Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Faserorientierung und resultierenden Eigenschaften von Faser-Matrix-Systemen erlaubt die Abschätzung der Obergrenze der mechanischen Eigenschaften dieser Systeme mit einfachen Handformeln.

Abbildung 3.2 zeigt vorwiegend längsgerichtete Fasersysteme mit den jeweiligen Auswirkungen auf mechanische Eigenschaften, wie Steifigkeit und Festigkeit (Flemming, et al., 1995).

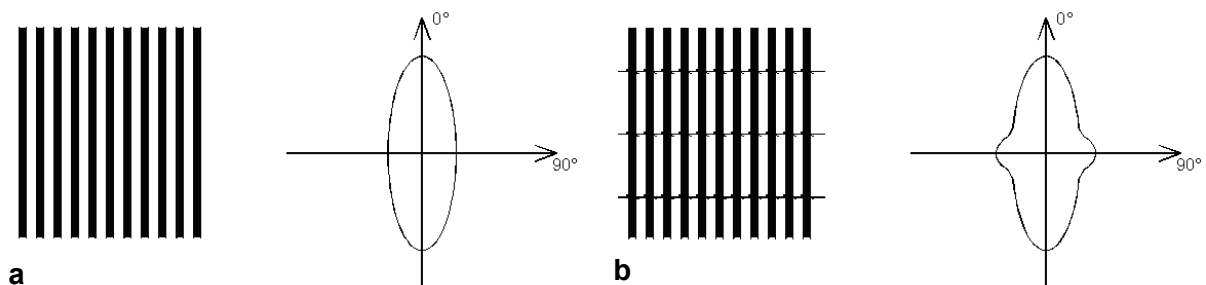


Abbildung 3.2: Faserorientierung mit Auswirkung auf die Belastbarkeit (Flemming, et al., 1995); a: unidirektional in Bündeln (Rovings), b: kettverstärkt

Mehraxial gerichtete Systeme sind in Abbildung 3.3 dargestellt. Dabei kann unterschieden werden in zweidimensionale Gelegesysteme und multiaxial räumlich verteilte Faserorientierungen (Flemming, et al., 1995).

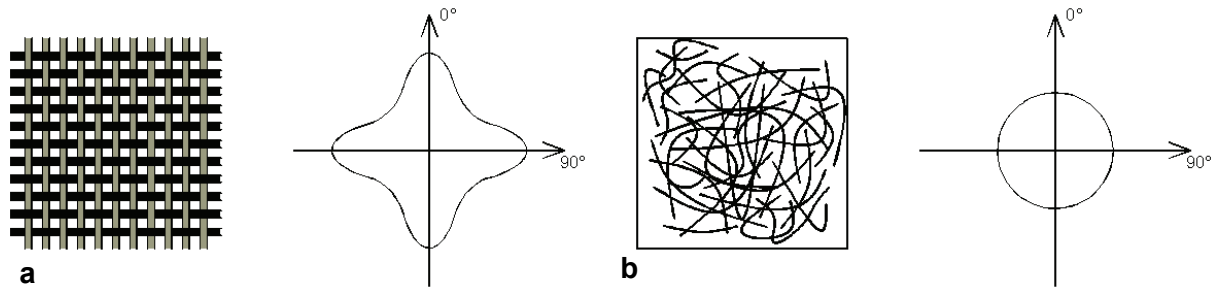


Abbildung 3.3: Faserorientierung mit Auswirkung auf die Belastbarkeit (Flemming, et al., 1995); a: bidirektional (z. B. Leinwandbindung), b: quasi-isotrop

Wesentliche mechanische Kenngrößen, wie E-Modul und Bruchfestigkeit, können aus dem Faseranteil und der Orientierung ermittelt werden. Der E-Modul eines Faser-Matrix-Systems kann bei unidirektionaler Faserrichtung ingenieurmäßig ermittelt werden mit:

$$E_{\text{Faser-Matrix}} = E_{\text{Faser}} \times \frac{A_{\text{Faser}}}{A_{\text{Faser-Matrix}}} + E_{\text{Matrix}} \times \frac{A_{\text{Matrix}}}{A_{\text{Faser-Matrix}}} = \frac{A_{\text{Faser}} \times E_{\text{Faser}} + A_{\text{Matrix}} \times E_{\text{Matrix}}}{A_{\text{Faser-Matrix}}} \quad (3.1)$$

Bei Faser-Matrix-Systemen mit stochastisch isotrop verteilten Faserausrichtungen kann der richtungsunabhängige E-Modul mittels der semiempirischen HALPIN-TSAI-Gleichung (Bhagwan, et al., 2006) abgeschätzt werden mit:

$$E_{\text{Faser-Matrix-isotrop}} = \frac{3}{8} E_L + \frac{5}{8} E_T \quad (3.2)$$

mit: E_L longitudinaler E-Modul

E_T transversaler E-Modul

$$E_L = E_{\text{Matrix}} \times \frac{1 + \left(2 \frac{L_{\text{Faser}}}{d_{\text{Faser}}} \right) \times \eta_L \times v_{\text{Faser}}}{1 - \eta_L \times v_{\text{Faser}}} \quad (3.3)$$

v_{Faser} Faservolumenanteil bezogen auf das Gesamtvolumen

$$\eta_L = \frac{\left(\frac{E_{\text{Faser}}}{E_{\text{Matrix}}} \right) - 1}{\left(\frac{E_{\text{Faser}}}{E_{\text{Matrix}}} \right) + 2 \left(\frac{L_{\text{Faser}}}{d_{\text{Faser}}} \right)} \quad (3.4)$$

$$E_T = E_{\text{Matrix}} \times \frac{1 + 2\eta_T \times v_{\text{Faser}}}{1 - \eta_T \times v_{\text{Faser}}} \quad (3.5)$$

$$\eta_T = \frac{\left(\frac{E_{\text{Faser}}}{E_{\text{Matrix}}} \right) - 1}{\left(\frac{E_{\text{Faser}}}{E_{\text{Matrix}}} \right) + 2} \quad (3.6)$$

Eine Erhöhung des E-Moduls kann damit erzielt werden durch die:

- Erhöhung der Grund E-Moduli E_{Faser} und E_{Matrix} ,
- Erhöhung des Faservolumenanteils v_{Faser} ,
- Erhöhung des Verhältnisses $\frac{L_{\text{Faser}}}{d_{\text{Faser}}}$.

Grundsätzlich lässt sich dieser berechnete E-Modul nur erreichen, wenn die Adhäsion zwischen Faser und Matrix als nicht systemrelevant angesehen werden kann. Ein nach der HALPIN-TSAI-Gleichung berechnete E-Modul entspricht daher einem oberen Grenzwert.

3.1.3 Ausgangswerkstoffe

Faserverstärkte Klebstoffe beziehen ihre Eigenschaften im Wesentlichen aus den Grundeigenschaften von:

- Klebstoff,
- Faserwerkstoff und
- Füllstoff.

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Eigenschaften ausgewählter Ausgangswerkstoffe beschrieben. Für die Entwicklung faserverstärkter Klebstoffe gelten ähnliche Grundlagen, die auch bei der Herstellung von Faser-Matrix-Systemen Anwendung finden. Diese sind in Abschnitt 2.2.3 auf Seite 23 beschrieben.

Klebstoffe

Aus der Vielzahl zur Verfügung stehender strukturell tragfähiger Klebstoffe sind geeignete Klebstoffe auszuwählen, die ein optimales Trag- und Verbundverhalten aufweisen. Die Verwendung anaerob härtender Klebstoffe zeigt sich dabei als vorteilhaft, da die hiermit hergestellten faserverstärkten Klebstoffe ohne externe Hilfsmittel aushärten und somit sehr universell einsetzbar sind. Eine systematische Übersicht gebräuchlicher Klebstofftypen wird im Anhang in Abschnitt A.4 gegeben. Die guten mechanischen Grundeigenschaften von 2K-Epoxidharzklebstoffen, insbesondere die hohen Steifigkeiten und Festigkeiten, empfehlen diese Klebstofftypen für die Anwendung in Faserverbundwerkstoffen. Eine Verwendung von ebenfalls steifen Polyurethan oder Acrylatklebstoffen scheint möglich, wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Füllstoffe

Füllstoffe, wie Quarzsand oder Metallpartikel, führen in erster Linie zur Erhöhung der Steifigkeit und Druckfestigkeit von Klebstoffen. So kann mittels hochgefüllter Systeme die Grundsteifigkeit des Klebstoffs um bis zu 500 % gesteigert werden. Die Viskosität des Klebstoffes erhöht sich durch den Füllstoff deutlich. Weiterhin steigt die Topfzeit und die Aushärtezeit an, was durch die Behinderung des Polymerwachstums während der Aushärtung verursacht wird. Der Einsatz von Füllstoffen hat, eine Verträglichkeit zwischen Klebstoff und Füllstoff vorausgesetzt, bis zu einem bestimmten Füllstoffanteil nur geringe Auswirkungen auf die Zugfestigkeit des Klebstoffes.

Fasern

Für die Herstellung faserverstärkter Werkstoffe stehen eine Vielzahl unterschiedlicher Faserwerkstoffe zur Verfügung. In Abschnitt A.5 des Anhangs wird eine Übersicht zu gebräuchlichen Faserwerkstoffen gegeben. Bei den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten faserver-

stärkten Klebstoffen werden Kohlenstofffasern schwerpunktmäßig betrachtet. Diese Fasern vereinigen Vorteile der mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit und Festigkeit) mit positiven Verbundeigenschaften (hohes U/A-Verhältnis) und Verarbeitungseigenschaften (geringer Durchmesser und damit hohe Biegsamkeit) in nahezu idealer Weise miteinander.

Anforderung an Oberflächeneigenschaften

Die Oberflächeneigenschaften der Ausgangswerkstoffe sind bei der Betrachtung von faserverstärkten Klebstoffen von besonderer Bedeutung. Das betrifft insbesondere die Adhäsionseigenschaften, die den Werkstoffverbund prägen. Die Oberflächeneigenschaften der verwendeten Faserwerkstoffe und Füllstoffe sollten dabei speziell an die Anforderungen des Klebstoffs angepasst werden. Bei der Kombination von Faserwerkstoffen mit Epoxidharzklebstoff bietet sich zur Verbesserung der Adhäsionseigenschaften die Beschichtung der Fasern mit haftvermittelnden Silan an. Insbesondere bei Kohlenstofffaser-verstärkten Klebstoffen treten in den Endbereichen der Faser-Klebstoff-Verbindung hohe Schubbeanspruchungen auf. Für ein leistungsfähiges, mechanisch hoch beanspruchbares Faser-Matrix-System werden daher hohe Adhäsionskräfte zwischen Fasern und Matrix vorausgesetzt. Bei Füllstoffen ist diese Art der Oberflächenvorbehandlung nicht erforderlich, da die Beanspruchungen in der Adhäsionsfuge aufgrund der kompakten Geometrieform gleichmäßiger über die Oberfläche abgetragen werden als bei Faserwerkstoffen, die in Hauptspannungsrichtung ausgerichtet sind.

Da ein nachträgliches Reinigen von Fasern und Füllstoffen nur bedingt möglich ist, sollten Verunreinigungen aller Bestandteile in der Herstellungskette eines faserverstärkten Klebstoffs ausgeschlossen werden.

Eigenstressungen infolge des Aushärtvorgangs

Die chemische Reaktion der Klebstoffmonomere während des Aushärtvorgangs führt zu Schrumpfungen und damit zu Eigenstressungen, die sich innerhalb des Klebstoffs ausbilden. Die Qualität der Eigenstressung ist dabei abhängig von:

- der Art des Klebstoffs,
- geometrischen Parametern und
- Randbedingungen der Aushärtung.

Ein Teil der Eigenstressung wird infolge von Kriechvorgängen wieder aus dem Klebstoff ausgetragen. Der elastische Anteil verbleibt im ausgehärteten Klebstoffkörper.

Für einen stabförmigen Klebstoffkörper eines ausgehärteten zweikomponentigen Epoxidharzes mit den Abmessungen $b \times h \times l = 20 \times 20 \times 250 \text{ mm}^3$ ist der spannungsoptisch gemessene Gangunterschied in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Verteilung des Gangunterschieds über den Querschnitt ist sehr unterschiedlich und weist hohe Gradienten auf. Eine Charakteristik der verwendeten Messmethode ist, dass in Tiefenrichtung des Probekörpers integrierend gemessen wird. Aufgrund der ermittelten Gangunterschiede ist von einer räumlichen Verteilung der Eigenstressungen im gesamten Probekörper auszugehen.

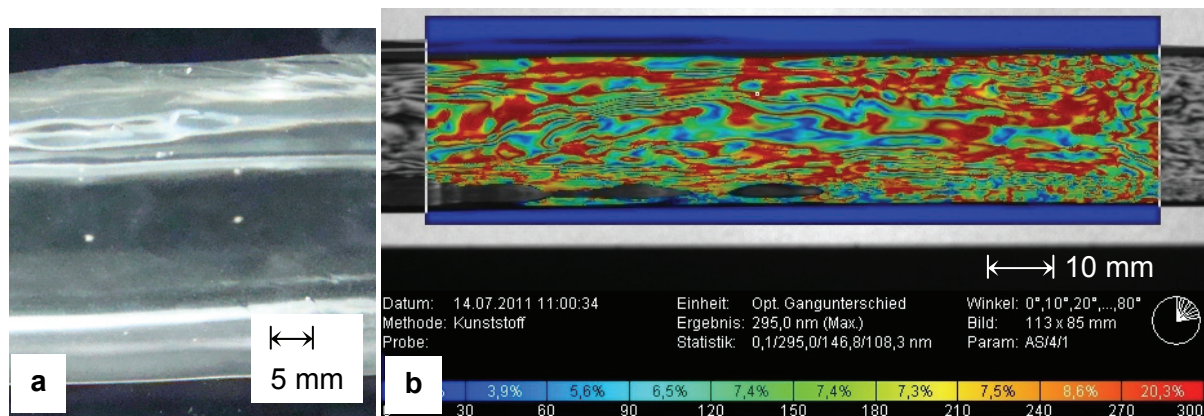


Abbildung 3.4: Eigenschaften einer ausgehärteten 2K-Epoxidharz-Klebstoffprobe; a: optische Transparenz; b: optischer Gangunterschied

Das spannungsoptische Verfahren kann nur bei transparenten Prüfkörpern angewendet werden. Eine Bestimmung des Eigenspannungszustandes von gefüllten oder faserverstärkten Klebstoffen ist damit nicht möglich. Aufgrund der hier beobachteten Eigenspannungen ist jedoch davon auszugehen, dass Aushärtvorgänge in gefüllten oder faserverstärkten Klebstoffen ebenfalls Eigenspannungszustände hervorrufen.

3.1.4 Verbundbetrachtungen

Das Zusammenwirken von Klebstoff und Fasern in einem Klebstoff-Faser-Verbundwerkstoff wird neben den kohäsiven Eigenschaften der Ausgangsmaterialien auch von der Adhäsionsbindung der Ausgangswerkstoffe untereinander beeinflusst. Die Wirksamkeit der einzelnen Komponenten im Hybridsystem ist daher neben einer optimalen Adhäsionsbindung auch von den Wechselwirkungen der Systembestandteile des Klebstoff-Faser-Verbundwerkstoffs untereinander abhängig. Anhand ausgewählter Faser-Matrix- oder Partikel-Matrix-Systeme werden unterschiedliche Wechselwirkungen bei definierten Randbedingungen analysiert und ausgewertet. Die Ergebnisse der geführten Untersuchungen sind in diesem Abschnitt dargestellt.

Quarzsand- oder Metallpartikel-gefüllte Systeme sind bereits als ausgereifte Produkte im Handel verfügbar und werden vielfältig eingesetzt. Sie besitzen im Vergleich zu herkömmlichen Klebstoffpolymeren sehr hohe Steifigkeiten und Druckfestigkeiten, weisen jedoch keine gesteigerten Zugfestigkeiten auf. Die Anwendung von Klebstoffen als Werkstoff zur Übertragung vielschichtiger mechanischer Beanspruchungen führt zu mechanischen Zuständen, bei denen neben Druck- und Scherbeanspruchungen immer Zugbeanspruchungen auftreten. Hier bieten faserverstärkte Klebstoffe gegenüber einfachen, unverstärkten Klebstoffen den Vorteil, höhere Zugbeanspruchungen abtragen zu können. Daneben führt die Faserverstärkung auch zu einer Erhöhung der Steifigkeit und der Druckfestigkeit, was hauptsächlich durch die Erhöhung der Querkzugfestigkeit verursacht wird.

Während der Entwicklung faserverstärkter Klebstoffe sind eine Vielzahl unterschiedlicher Faser-Klebstoff-Varianten untersucht worden (Werner, 2008). Dabei kamen unterschiedliche Acrylat-, Polyurethan- und Epoxidharzklebstoffe sowie verschiedene Metallfasern, Glasfasern und Kohlenstofffasern zum Einsatz. Die quantitativen Eigenschaften dieser genannten Systeme unterscheiden sich stark voneinander. Das betrifft jedoch nicht das qualitative mechanische Faser-Klebstoff-System, dass in den folgenden Abschnitten beschrieben werden soll.

Einfache Faser-Klebstoff-Systeme

Die numerische Analyse von mechanischen Wechselwirkungen in Mikro- bzw. Mesoebene faserverstärkter Kunststoffe bzw. Klebstoffe ermöglicht es, detaillierte Informationen über das Faserverbundverhalten zu erlangen. Es werden umfangreiche Untersuchungen zur Wirkungsweise des Faserverbundes in der Matrix durchgeführt, die im Ergebnis eine gezielte Optimierung der Trageigenschaften des KfV zulassen. Dabei ist insbesondere die strukturelle Kopplung zwischen Faseroberfläche und Kunststoffmatrix zu optimieren, da nur bei optimalem Verbund die Steifigkeit und Festigkeit der Fasern im Verbundsystem optimal genutzt werden kann.

In der numerischen Analyse können die für ein Faser-Matrix-System wesentlichen Systemgrößen:

- der Beanspruchungen in der Adhäsionsfuge Faser-Matrix und der
- Beanspruchungen in den Fasern,

betrachtet werden. Dabei können Einflüsse einzelner Parameter der:

- Geometrie und
- Materialmodelle

gezielt untersucht werden, um Ansätze für eine Optimierung des Faser-Matrix-Systems zu liefern.

Für den einfachen Fall eines unidirektionalen Faser-Matrix-Systems mit zwei sich übergreifenden Fasern wird das Faserverbundsystem mittels der FEM analysiert. Folgende Modellparameter werden dabei verwendet:

- Kohlenstofffaser:
 - $\varnothing 7 \mu\text{m}$, $L = 150 \mu\text{m}$, $E = 300.000 \text{ N/mm}^2$,
 - Übergreifungslänge $L_1 = 60 \mu\text{m}$, Faserabstand $d_1 = 13 \mu\text{m}$,
 - Temperaturdehnungskoeffizient $\alpha_T = 0,2 \times 10^{-6} / \text{K}$.
- Matrix:
 - Gesamtlänge $L_{\text{ges}} = 300 \mu\text{m}$,
 - $E = 1.000 \text{ N/mm}^2$,
 - Temperaturdehnungskoeffizient $\alpha_T = 230 \times 10^{-6} / \text{K}$.

In den dargestellten numerischen Analysen werden die Materialkennwerte als temperaturunabhängig angesetzt und viskose Verformungsvorgänge vernachlässigt. Daher entsprechen die ermittelten Beanspruchungen im Faser-Matrix-System theoretisch möglichen Höchstbeanspruchungen, die praktisch nicht oder nur kurzzeitig erreicht werden.

Die Belastungssituationen untergliedern sich in:

- die mechanische Beanspruchung der Matrix,
- Temperaturdehnung aus gleichmäßiger Erwärmung,
- das Herausziehen einer Faser aus der Matrix.

Die Auswirkungen dieser Beanspruchungszustände werden in den folgenden Abschnitten analysiert.

Mechanische Beanspruchung der Matrix

Die mechanische Beanspruchung auf ein Faser-Matrix-System führt zu Wechselwirkungen zwischen Faser und Matrix. Als Belastung wird eine äußere Dehnung auf das Faser-Matrix-

System in Faserlängsrichtung aufgebracht. Die modellierten Randbedingungen sind in Abbildung 3.5 dargestellt.

- Beanspruchung: Zugdehnung der Matrix an den Endflächen $\varepsilon = 0,01$

Die auf das Modell aufgebrachte Beanspruchung von $\varepsilon = 0,01$ (Zug) entspricht einer Normalspannung in der unverstärkten Matrix von $\sigma = 10 \text{ N/mm}^2$. Die in einem solchen Faserverbundsystem entstehenden Faserbeanspruchungen sind aufgrund des Steifigkeitsquotienten zwischen Faser und Matrix sehr hoch. Das führt zu hohen Beanspruchungen in der Adhäsionsschicht zwischen Faser und Matrix. Ergebnisse einer numerischen Betrachtung eines einfachen Faser-Matrix-Systems infolge äußerer Beanspruchung von $\varepsilon = 0,01$ sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Die Auswertung der über die jeweiligen Faserlängen aufgetragenen Schubspannungen und Normalspannungen zeigt Abbildung 3.6.

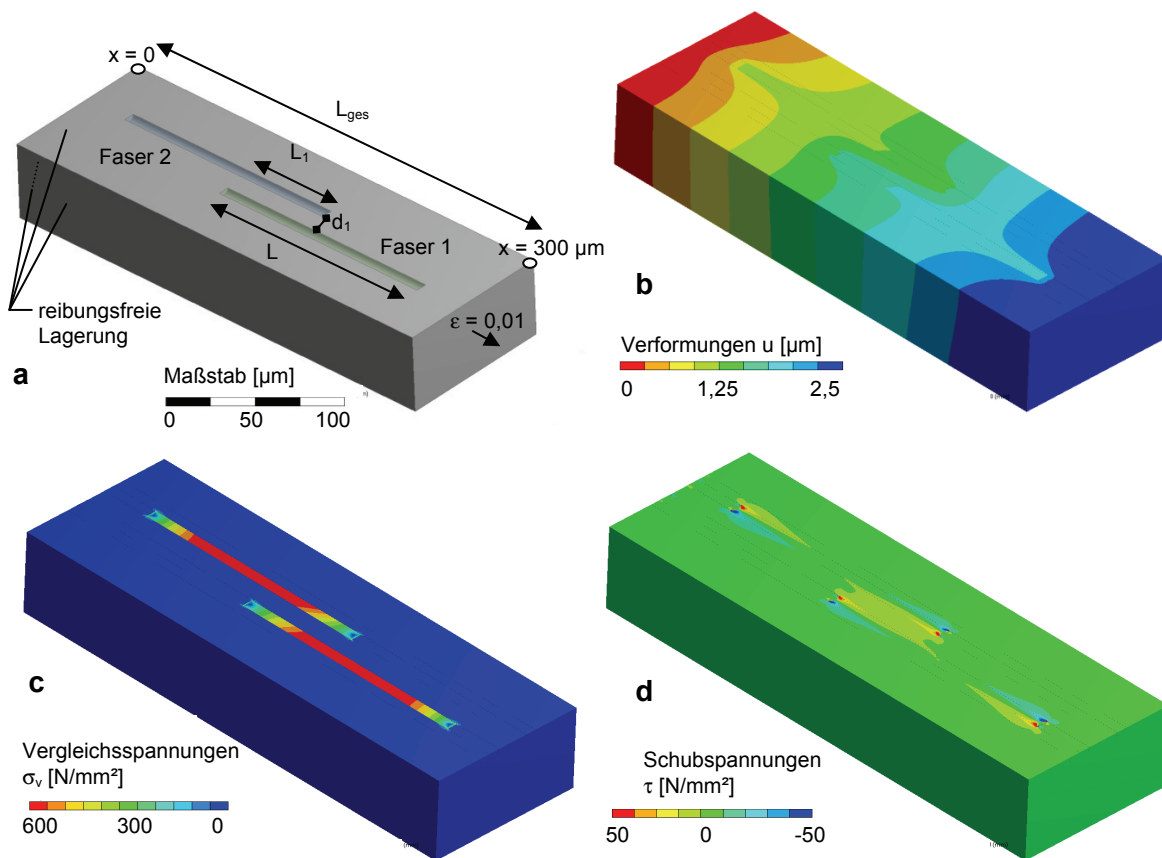


Abbildung 3.5: Ergebnisse der FEM-Analyse eines unidirektionalen Faser-Matrix-Systems; Beanspruchungen infolge äußerer Belastung $\varepsilon = 0,01$; a: geometrisches System mit aufgebrachtter Last; b: Verformungen [mm]; c: Vergleichsspannungen [N/mm^2]; d: Schubspannungen im Faser-Matrix-System

Es wird ersichtlich, dass trotz relativ geringer Beanspruchung am Gesamtmodell im Faser-Matrix-System sehr hohe Belastungen auf die Fasern und die Adhäsionsschicht zwischen Faser und Matrix wirken. Das ist mit dem vorliegenden Unterschied zwischen den Steifigkeiten von Faser und Matrix zu erklären. Die Fasern ziehen aufgrund ihrer hohen Steifigkeit große Beanspruchungen aus dem System und erzeugen damit in den Faserendbereichen eine mechanisch-strukturelle Kerbe. Abbildung 3.6a zeigt die Normalspannung im Faser-Matrix-System, auf die Achse der jeweiligen Fasern projiziert. Es ist zu erkennen, dass die Normalspannungen im Bereich der Fasern sehr hoch sind und in den Endbereichen stark abfallen. Die Normalspannungsgradienten stehen in direktem Verhältnis zu den Schubspan-

nungen, die in der Adhäsionsfuge zwischen Fasern und Matrix auftreten. Das führt zu hohen lokalen Schubbeanspruchungen in der Verbundfuge zwischen Faser und Matrix, dargestellt in Abbildung 3.6b.

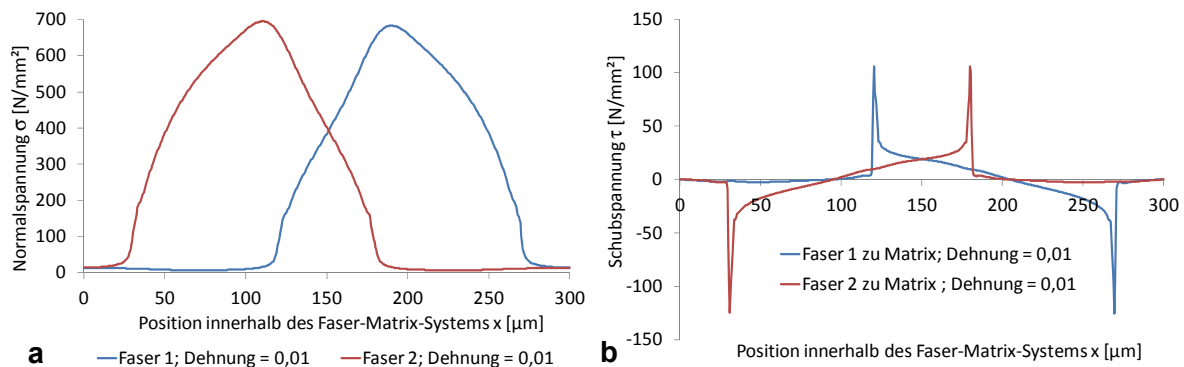


Abbildung 3.6: Ergebnisse der FEM-Analyse eines unidirektionalen Faser-Matrix-Systems Beanspruchungen infolge äußerer Belastung $\varepsilon = 0,01$; a: Normalspannungen in Faserlängsrichtung; b: Schubspannungen in der Adhäsionsfuge Faser-Matrix

Temperaturdehnung aus gleichmäßiger Erwärmung

Aufgrund der großen Differenz der Temperaturdehnungskoeffizienten zwischen Faser und Matrix führt eine gleichmäßige Temperaturerhöhung des Faser-Matrix-Systems zu ähnlichen Beanspruchungen, wie sie durch äußere mechanische Belastungen hervorgerufen werden. Die für eine gleichmäßige Temperaturerhöhung von $v_0 = 20$ auf $v_1 = 80$ °C numerisch ermittelten Beanspruchungen im Faser-Matrix-System sind in Abbildung 3.7 dargestellt. Abbildung 3.8 zeigt die numerisch berechneten Normal- und Schubspannungen, die in den Fasern vorliegen.

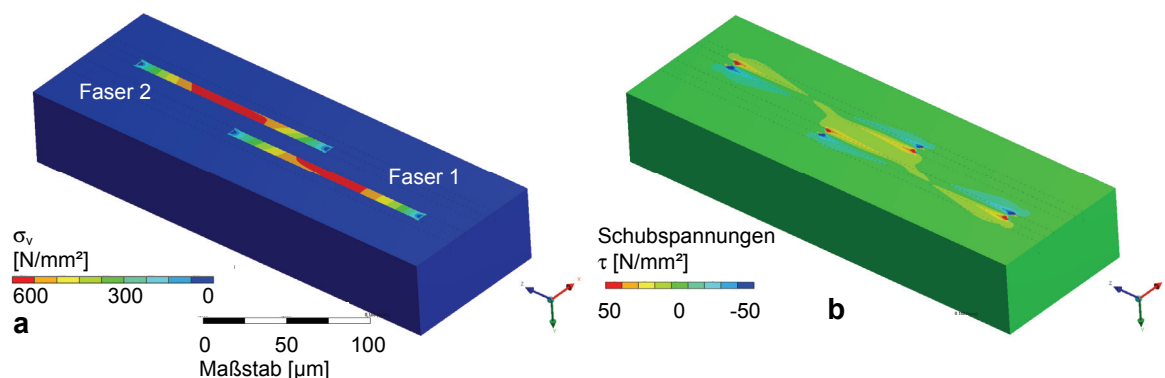


Abbildung 3.7: Ergebnisse der FEM-Analyse eines unidirektionalen Faser-Matrix-Systems; Temperaturerhöhung von $v_0 = 20$ auf $v_1 = 80$ °C; a: Vergleichsspannungen innerhalb des Faser [N/mm²]; b: Schubspannungen innerhalb des Faser-Matrix-Systems [N/mm²]

Die Beanspruchungen innerhalb der Fasern sowie der Adhäsionsfuge zwischen Faser und Matrix sind qualitativ vergleichbar mit Beanspruchungen, die infolge einer Zugbelastung des Faser-Matrix-Systems entstehen. Die positiven Normalspannungen innerhalb der Faser sind dabei generell für Kohlenstofffasern als unkritisch zu betrachten, die Schubbeanspruchung kann hingegen bei nicht ausreichendem Verbund zu einem Adhäsionsversagen zwischen Faser und Matrix führen.

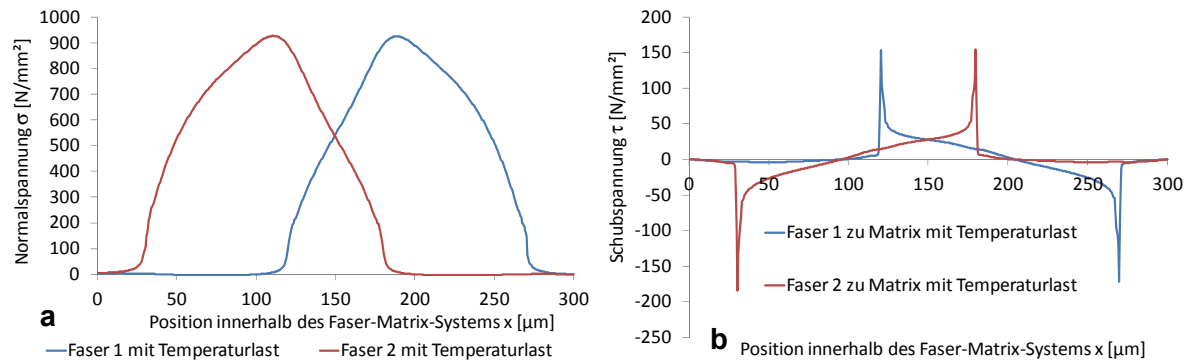


Abbildung 3.8: Ergebnisse der FEM-Analyse eines unidirektionalen Faser-Matrix-Systems; Temperaturerhöhung von $v_0 = 20$ auf $v_1 = 80$ °C; a: Normalspannungen in Faserlängsrichtung; b: Schubspannungen in der Adhäsionsfuge Faser-Matrix

Eine Überlagerung von statischer und Temperaturbeanspruchung kann zu einer weiteren Steigerung der Beanspruchung führen. Insbesondere die Überlagerung von hohen Temperaturen und zusätzlich aufgebrachten Zugbeanspruchungen stellt eine kritische Lastsituation dar, da beide Beanspruchungsarten in gleicher Richtung wirken. Die Überlagerung von niedrigen Temperaturen und aufgebrachten Zugspannungen ist dagegen weniger kritisch, da diese Beanspruchung zwei gegensätzlich wirkende Lastsituationen beinhaltet.

Herausziehen einer Faser aus der Matrix

Das Versagen von Faser-Matrix-Systemen mit Kurzschnittfasern wird meist ausgelöst durch ein Adhäsionsversagen in der Verbundfuge zwischen Faser und Matrix. Der Initialriss entsteht dabei jeweils an den Faserenden und pflanzt sich dann in Richtung Fasermittelte fort. Die Faser wird anschließend aus der Matrix herausgezogen und das Faser-Matrix-System erhält seine Festigkeitseigenschaften nur noch über die Matrix. Bei Überschreitung der Matrixfestigkeit erfolgt dann schlagartiges Versagen, bei dem die Fasern nicht als rissüberbrückende Elemente genutzt werden können. Die Festigkeit von Faser-Matrix-Systemen kann über drei wesentliche Systemeigenschaften gesteuert werden:

- dem volumenbezogenen Faseranteil im Faser-Matrix-System,
- der vorhandenen Adhäsionskraft zwischen Faser und Matrix und
- den Schubspannungsspitzen zwischen Faser und Matrix.

Die Höhe der maximal auftretenden Schubspannung im Faser-Matrix-System ist stark vom Steifigkeitsquotienten zwischen Faser und Matrix abhängig. Dieser Zusammenhang kann numerisch dargestellt werden. Für verschiedene Faser-Matrix-Systeme, bei denen eine herausstehende Faser mit einer (Zug-)Normalspannung $\sigma = 1.000$ N/mm² in Faserlängsrichtung belastet wird, sind die numerisch ermittelten Spannungszustände in Abbildung 3.9 dargestellt. Die Höhe der auftretenden maximalen Schubbeanspruchung in der Adhäsionsschicht Faser-Matrix lässt sich durch den Steifigkeitsquotienten zwischen Faser und Matrix beeinflussen. Eine Erhöhung der Matrixsteifigkeit führt zu einer gleichmäßigen Spannungsumlagerung zwischen Faser und Matrix, wodurch die auftretenden Maximalspannungen stark reduziert werden.

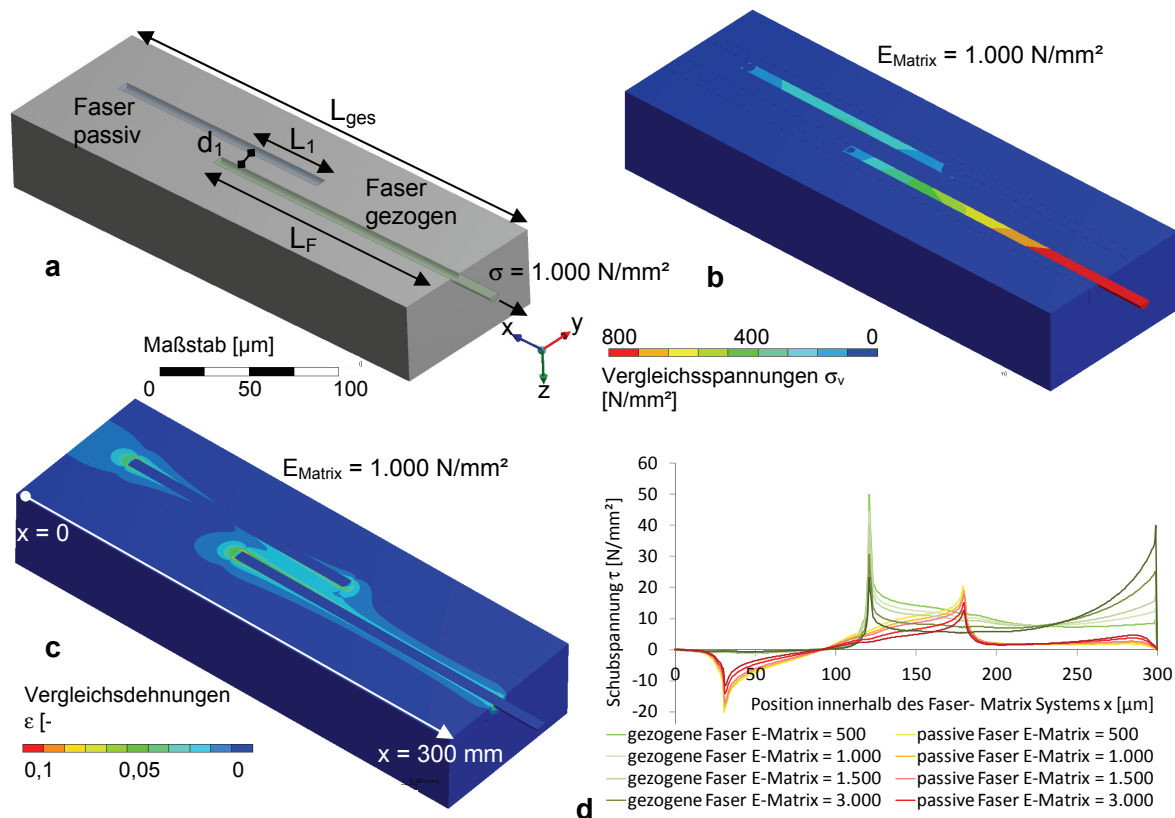


Abbildung 3.9: Ergebnisse der FEM-Analyse eines Faser-Matrix-Systems mit unidirektional gerichteten Fasern; Beanspruchungen infolge Aufbringung einer Zugspannung: $\sigma_{l\ddot{a}ngs} = 1.000 \text{ N/mm}^2$ auf der herausstehenden Faser; a: geometrisches System mit aufgebrachtter Last; b: Vergleichsspannungen $[\text{N/mm}^2]$; c: Vergleichsdehnungen $[-]$; d: Schubspannungen im Faser-Matrix-System infolge der Lastumlagerung im Faser-Matrix-System in Abhängigkeit der Matrixsteifigkeit

Einen Vergleich der auftretenden Schubspannungen bei gleicher Belastung, aber unterschiedlicher Matrix-Steifigkeit zeigt Abbildung 3.10.

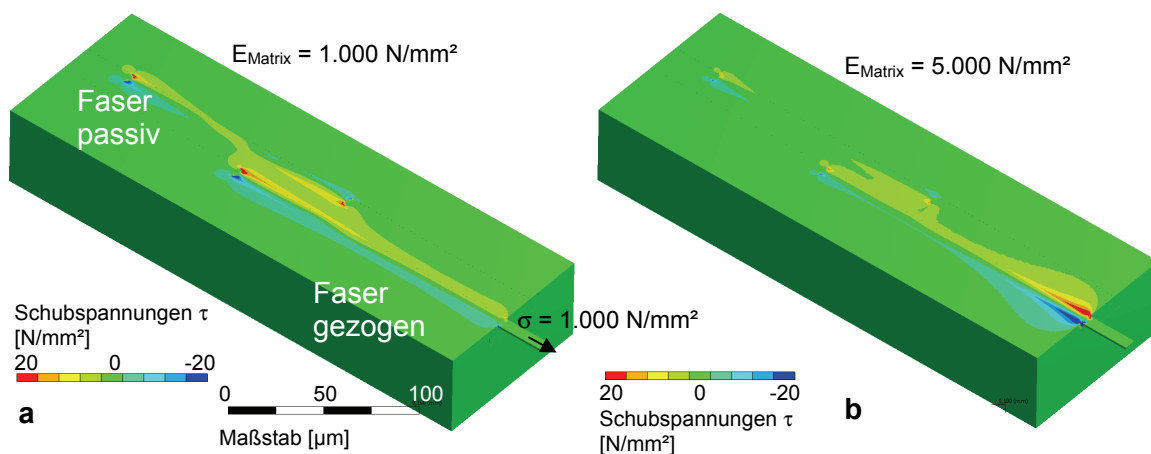


Abbildung 3.10: Ergebnisse der FEM-Analyse der Schubspannungsverteilung innerhalb eines Faser-Matrix-Systems; Beanspruchungen infolge Aufbringung einer Zugspannung: $\sigma_{l\ddot{a}ngs} = 1.000 \text{ N/mm}^2$ auf der herausstehenden Faser; a: $E_{Matrix} = 1.000 \text{ N/mm}^2$; b: $E_{Matrix} = 5.000 \text{ N/mm}^2$;

Die Schubspannungen sind sowohl qualitativ als auch quantitativ von dem Steifigkeitsverhältnis des Faser-Matrix-Systems abhängig. Bei einer Matrixsteifigkeit $E_{\text{Matrix}} = 1.000 \text{ N/mm}^2$ ist die Schubspannung im Faserendbereich ca. 3-mal höher als bei $E_{\text{Matrix}} = 5.000 \text{ N/mm}^2$. Die Festigkeit eines Faser-Matrix-Systems lässt sich somit durch die Verwendung einer höhermoduligen Matrix stark erhöhen. Die Faserlänge hat dabei nur geringen Einfluss auf die Höhe maximalen Schubspannungen, die in der Adhäsionsschicht zwischen Faser und Matrix auftreten.

Partikelgefüllte Klebstoffsysteme

Die Füllung eines Klebstoffs mit Partikeln mit hoher Materialsteifigkeit erzeugt einen Verbundwerkstoff der, verglichen mit dem Ausgangsklebstoff, stark modifizierte Eigenschaften aufweist. Die Partikelfüllung führt zu einem starken Anstieg der Steifigkeit und Druckfestigkeit. In einer numerischen Analyse an einem Partikel-Matrix-Mikromodell mit den Parametern:

- Würfelausschnitt eines Faser-Matrix-Systems $a = 200 \text{ }\mu\text{m}$,
- 100 kugelförmige Partikel $d = 20 \dots 60 \text{ }\mu\text{m}$ stochastisch verteilt,
- Partikelvolumenanteil $\text{Vol}_{\text{Partikel}} = 38,6 \text{ }\%$,
- $E_{\text{Matrix}} = 1.000 \text{ N/mm}^2$; $E_{\text{Partikel}} = 32.000 \text{ N/mm}^2$,
- aufgebrachte Dehnung $\varepsilon = -1 \text{ }\%$ (Druckbeanspruchung),

werden die mechanischen Reaktionen infolge einer aufgebrachten Verformung berechnet. Die numerisch ermittelten Beanspruchungen innerhalb des Partikel-Matrix-Systems sind in Abbildung 3.11 dargestellt. Für die Ermittlung der Vergleichsspannung wird davon ausgegangen dass die Hypothese von Mises angewendet werden kann. Eine experimentelle Überprüfung der Spannungszustände in Mikro- bzw. Mesoebene ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

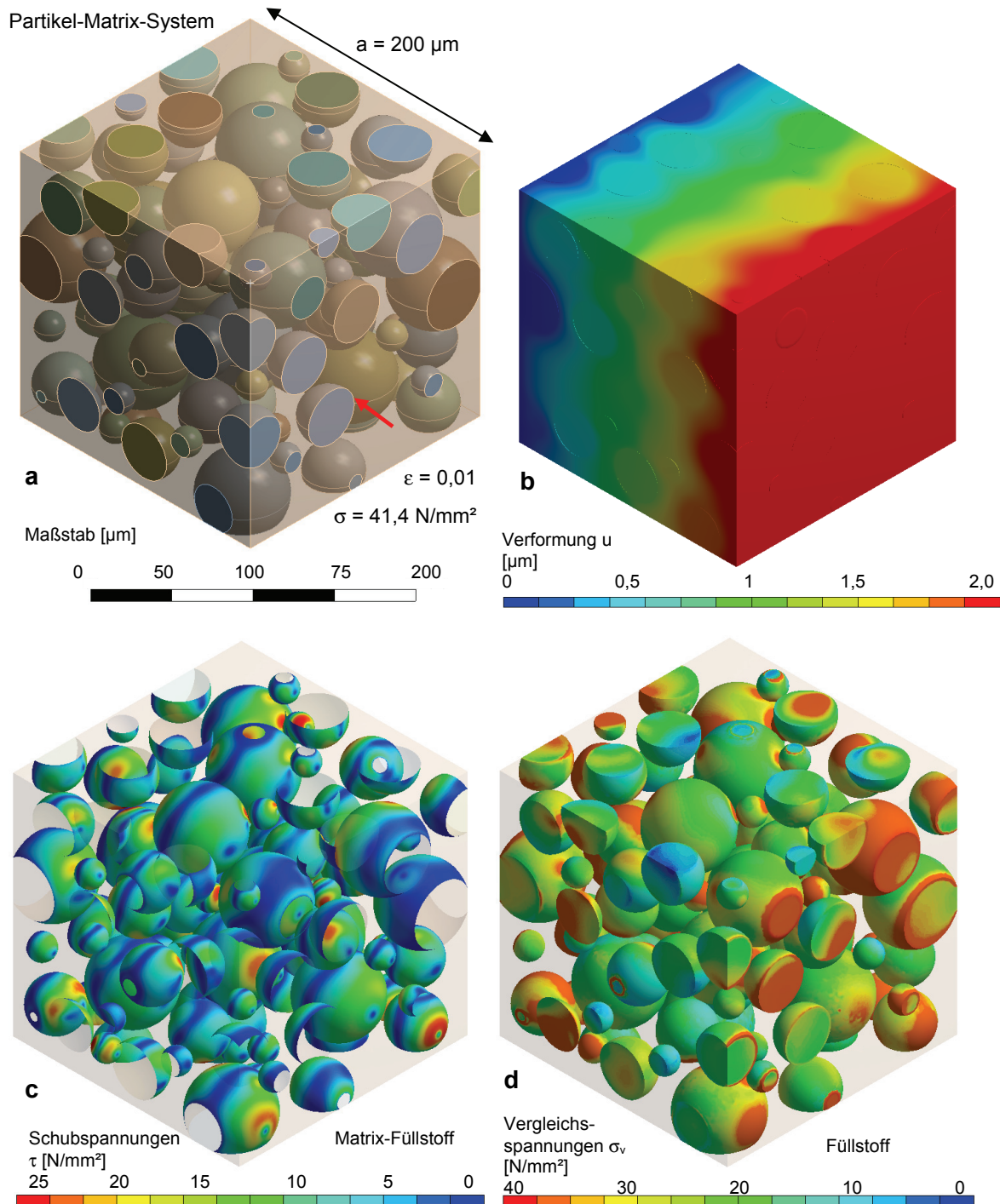


Abbildung 3.11: Ergebnisse der FEM-Analyse eines stochastisch verteilten Partikel-Matrix-Systems; a: geometrisches System mit Beanspruchung; b: Verformungen des Partikel-Matrix-Systems $[\mu\text{m}]$; c: Schubspannungen im Partikel-Matrix-System $[\text{N/mm}^2]$; d: Vergleichsspannungen in den Partikeln $[\text{N/mm}^2]$

Die Steifigkeit dieses Systems auf Druckbeanspruchung wird mit

$$E = 4.140 \text{ N/mm}^2$$

numerisch bestimmt. Experimentelle Untersuchungen an hochgefüllten Quarzsand-Epoxidharzsystemen ergeben Steifigkeiten die im Wesentlichen von den Partikelfüllgraden abhängig sind. Die experimentell ermittelten Steifigkeiten betrugen $4.000 \text{ N/mm}^2 \leq E \leq 12.500 \text{ N/mm}^2$. Die für hochsteife Partikel-Matrixsysteme erforderlichen

Partikelfüllgrade $\text{Vol}_{\text{Partikel}} > 85\%$ sind in numerischen Modellen sehr schwer zu erreichen, da hier die Grenzen der aktuellen Modellierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Erstellung eines robusten Modells überschritten werden.

Der Zusammenhang zwischen Partikelanteil in der Matrix und der resultierenden Steifigkeit des Partikel-Matrix-Systems ist nichtlinear ausgebildet. Im untersuchten System weisen die partikelfreien Matrixbereiche eine lokale Steifigkeit auf, die der Matrixsteifigkeit entspricht. Die Gesamtsteifigkeit wird somit bis zu einem definierten Faserfüllgrad von der Steifigkeit der Matrix dominiert. Bei hohen Partikelfüllgraden, die dazu führen, dass die Partikel innerhalb der Matrix aneinanderstoßen, steigt die Steifigkeit des Partikel-Matrix-Systems stark an. Die mechanische Interaktion der Partikel untereinander kann über die Verteilung der Vergleichsspannungen bzw. Vergleichsdehnungen im Partikel-Matrix-System betrachtet werden. Die Auswertung der numerisch berechneten Vergleichsspannungen bzw. Vergleichsdehnungen sind für das betrachtete Modell in Abbildung 3.12 dargestellt.

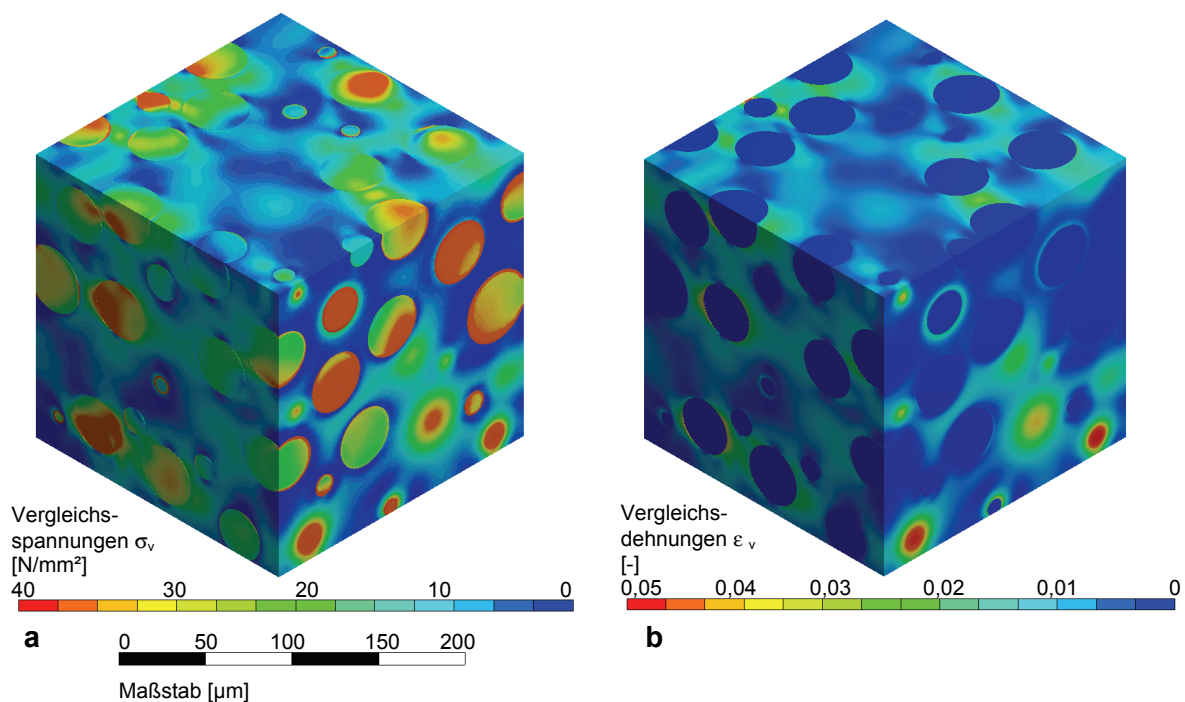


Abbildung 3.12: Ergebnisse der FEM-Analyse eines stochastisch verteilten Partikel-Matrix-Systems; a: Vergleichsspannungen im Partikel-Matrix-System [N/mm²]; b: Vergleichsdehnungen im Partikel-Matrix-System [N/mm²]

Das Versagen des Partikel-Matrix-Systems wird durch ein Adhäsionsversagen zwischen Partikel und Matrix oder einem Kohäsionsversagen innerhalb der Matrix eingeleitet. Auch bei hohen Druckbeanspruchungen sind die Querkzugbeanspruchungen innerhalb der Partikel relativ gering. Die kompakte Form der Partikel lässt eine hohe Spannungsaufnahme in den Partikeln nicht zu. Voraussetzung dafür wäre eine größere Ausdehnung der Partikel in Hauptbelastungsrichtung. Die geometrisch kompakte Form der Partikel in der Matrix erlaubt somit nur eine begrenzte Steigerung der Festigkeit des Gesamtsystems. Die Zugfestigkeit bleibt im Wesentlichen unbeeinflusst von der Partikelfüllung. Eine Steigerung der Druckfestigkeit ist jedoch durch die Partikelfüllung möglich, insbesondere bei hohen Partikelfüllgraden.

Ungerichtete Faser-Matrix-Systeme

Bei der Betrachtung einer mehrachsig gerichteten, quasi isotropen, Faser-Klebstoffmatrix unter mechanischer Beanspruchung werden drei wesentliche Dinge ersichtlich:

- Bei Fasern, die in Belastungsrichtung ausgerichtet sind, treten maximale Schubspannungen nur in den Faserendbereichen auf.
- Schubbeanspruchungen zwischen Fasern und Matrix reduzieren sich durch einen hohen Faserfüllgrad deutlich, da die Fasern in der Matrix zu einer Steifigkeitserhöhung des Faser-Matrix-Systems führen.
- Die Normalkraftbeanspruchung innerhalb der Fasern ist stark vom Winkel zwischen Faserlängsorientierung und Hauptspannungsrichtung abhängig.

Die in Abbildung 3.13 dargestellten Ergebnisse der numerischen Betrachtung eines ungerichteten Faser-Matrix-Systems basieren auf folgenden Parametern:

- Würfelausschnitt eines Faser-Matrix-Systems Kantenlänge $a = 200 \mu\text{m}$,
- 112 Fasern $d = 7 \mu\text{m}$ hauptsächlich in Belastungsrichtung verteilt,
- Faservolumenanteil $\text{Vol}_{\text{Faser}} = 8,28 \%$,
- $E_{\text{Matrix}} = 1.000 \text{ N/mm}^2$; $E_{\text{Faser}} = 300.000 \text{ N/mm}^2$,
- aufgebrachte Dehnung $\varepsilon = -0,01$ (Druckbeanspruchung).

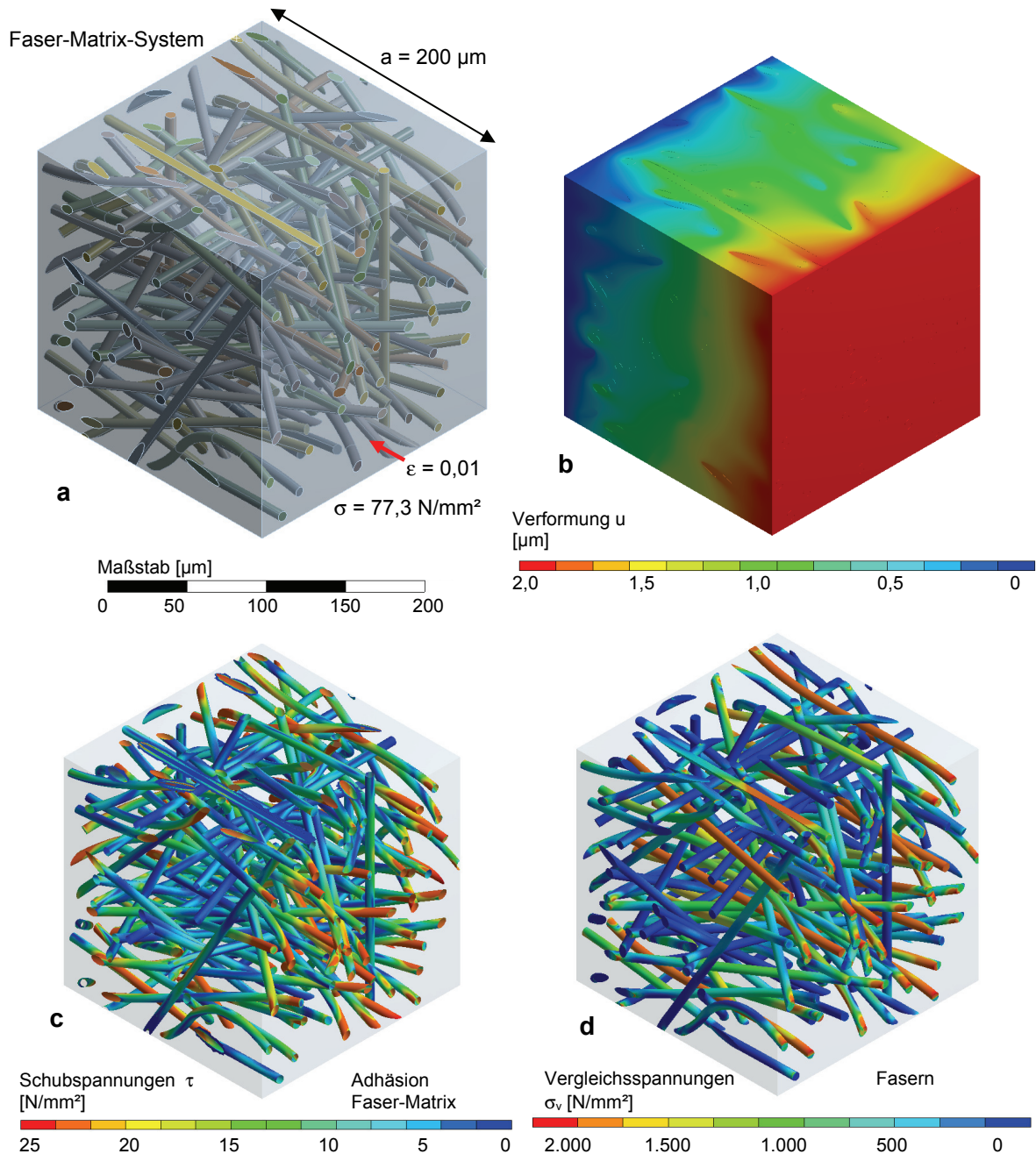


Abbildung 3.13: Ergebnisse der FEM-Analyse eines multiaxial ungerichteten Faser-Matrix-Systems; a: geometrisches System mit Beanspruchung; b: Verformungen des Faser-Matrix-Systems $[\mu\text{m}]$; c: Schubspannungen im Faser-Matrix-System $[\text{N/mm}^2]$; d: Vergleichsspannungen in den Fasern $[\text{N/mm}^2]$

Bei den Normalspannungen und Schubspannungen werden Spannungskonzentrationen in den Fasern ermittelt, die in Hauptbeanspruchungsrichtung orientiert sind. Rechtwinklig dazu liegende Fasern führen nur lokal zu einer höheren Steifigkeit und ziehen damit nur geringe Kräfte auf sich.

Die Steifigkeit dieses Systems auf Druckbeanspruchung wird mit

$$E = 7.728 \text{ N/mm}^2$$

numerisch bestimmt. Experimentelle Untersuchungen an faserverstärkten Epoxidharzklebstoffen mit Faserfüllgraden von $\text{Vol}_{\text{Faser}} = 5 \%$ bis $\text{Vol}_{\text{Faser}} = 20 \%$ haben ergeben, dass sich

die Steifigkeit des Faser-Matrix-Systems bis auf $E = 4.500 \text{ N/mm}^2$ mit dem geringen Faserfüllgrad und $E = 8.500 \text{ N/mm}^2$ mit dem hohem Faserfüllgrad steigern lässt. Ein limitierender Faktor stellt dabei der Mischvorgang dar, bei dem steifigkeitsmindernde Luft einschüsse im Faser-Matrix-System nicht zu vermeiden sind. Daher liegen speziell bei hochgefüllten Faser-Matrix-Systemen die experimentell ermittelten Steifigkeiten unterhalb der numerisch berechneten Werte.

Abbildung 3.14 zeigt den Verlauf der Vergleichsspannungen und Vergleichsdehnungen in dem numerisch analysierten Faser-Matrix-System. Dabei ist eine Konzentration der Dehnungen innerhalb der Matrix im direkten Grenzbereich zu den Fasern zu beobachten. Die numerisch berechnete Vergleichsdehnung ist im Bereich der Faserenden bis zu 20-mal höher als die Dehnung, die in einem isotropen Material vorliegt. Das führt zu lokalen Spannungskonzentrationen und insbesondere zu hohen Schubspannungen in der Adhäsionsfuge zwischen Faser und Matrix.

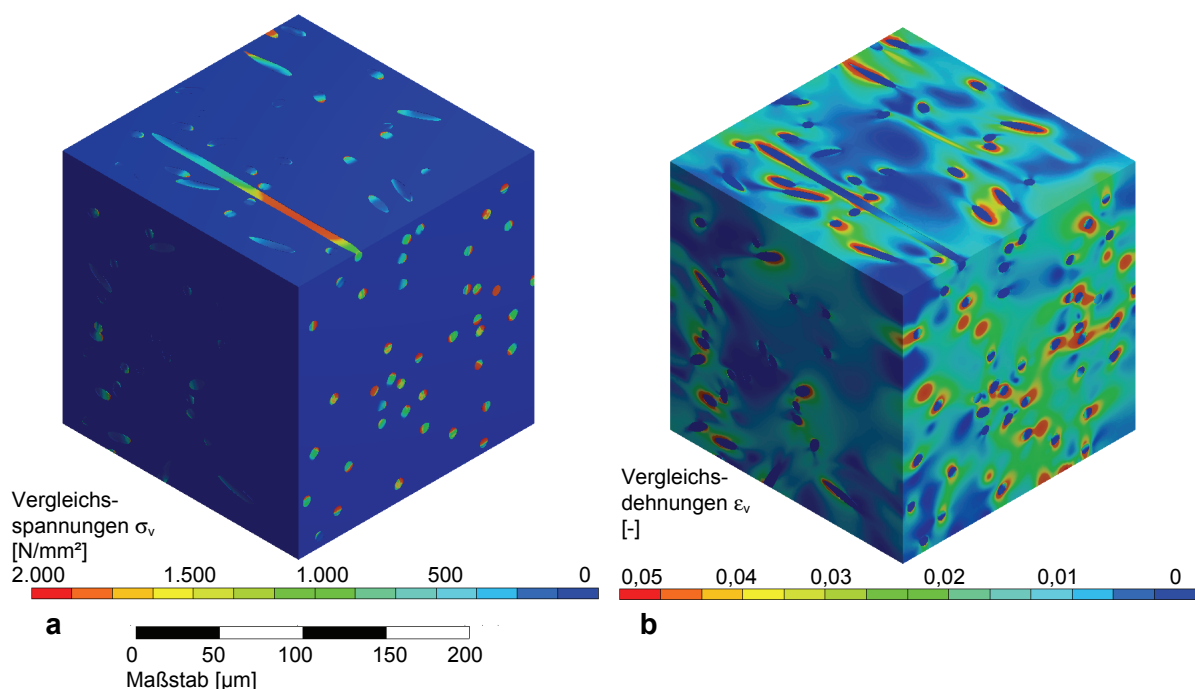


Abbildung 3.14: Ergebnisse der FEM-Analyse eines multiaxial ungerichteten Faser-Matrix-Systems; a: Vergleichsspannungen im Faser-Matrix-System [N/mm²] b: Vergleichsdehnungen im Faser-Matrix-System [N/mm²]

Das Adhäsionsversagen zwischen Faser und Matrix wird bei ungerichteten Faser-Matrix-Systemen immer von den in Belastungsrichtung orientierten Einzelfasern eingeleitet. Für den Fall, dass mehrere ähnlich in Belastungsrichtung ausgerichtete Fasern in direkter Nachbarschaft zueinander liegen, werden die Beanspruchungen auf die Fasern aufgeteilt und die Spitzenbeanspruchung nimmt ab. Systeme mit höherem Faseranteil zeigen damit Vorteile in der Vermeidung von Rissen. Systeme mit extrem geringen Faseranteil und einem großen Steifigkeitsquotienten zwischen Faser und Matrix haben dagegen den Nachteil, dass ein Initialriss in der Adhäsionsfuge Faser-Matrix schon bei sehr geringen Beanspruchungen der Matrix erfolgt. Nach dem Einsetzen des Initialrisses wird das Tragverhalten des Faser-Matrix-Systems ausschließlich durch die Matrix bestimmt. Systeme mit sehr geringem Faserfüllgrad bieten daher keine Vorteile gegenüber unverstärkten, homogenen Kunststoffsystemen. Das kann durch experimentelle Untersuchungen belegt werden, bei denen sehr gerin-

ge Faserfüllgrade $\text{Vol}_{\text{Faser}} < 0,5 \%$ keine Festigkeitssteigerungen bei Epoxidharzklebstoffen erzeugten.

Mehrkomponentige Systeme

Analog zu den Betrachtungen von multiaxial ungerichteten Faser-Matrix-Systemen zeigen zusätzlich mit Partikeln gefüllte Systeme ausgeprägte Spannungskonzentrationen in Bereichen mit hoher lokaler Steifigkeit. Die in Abbildung 3.15 dargestellten Ergebnisse einer numerischen Betrachtung an einem multiaxial ungerichteten Faser-Matrix-System basiert auf folgenden Parametern:

- Würfelausschnitt eines Faser-Matrix-Systems mit der Kantenlänge $a = 200 \mu\text{m}$,
- 112 Fasern $d = 7 \mu\text{m}$ hauptsächlich in Belastungsrichtung,
- Faservolumenanteil $\text{Vol}_{\text{Faser}} = 8,28 \%$,
- Partikelfüllung 16 Partikel; $E = 32.000 \text{ N/mm}^2$,
- Partikelvolumenanteil $\text{Vol}_{\text{Part}} = 3,79 \%$,
- $E_{\text{Matrix}} = 1.000 \text{ N/mm}^2$; $E_{\text{Faser}} = 300.000 \text{ N/mm}^2$,
- aufgebrachte Dehnung $\varepsilon = -0,01$ (Druckbeanspruchung).

Die Anordnung der Fasern ist deckungsgleich mit dem in Abbildung 3.13 betrachteten Faser-Matrix-System.

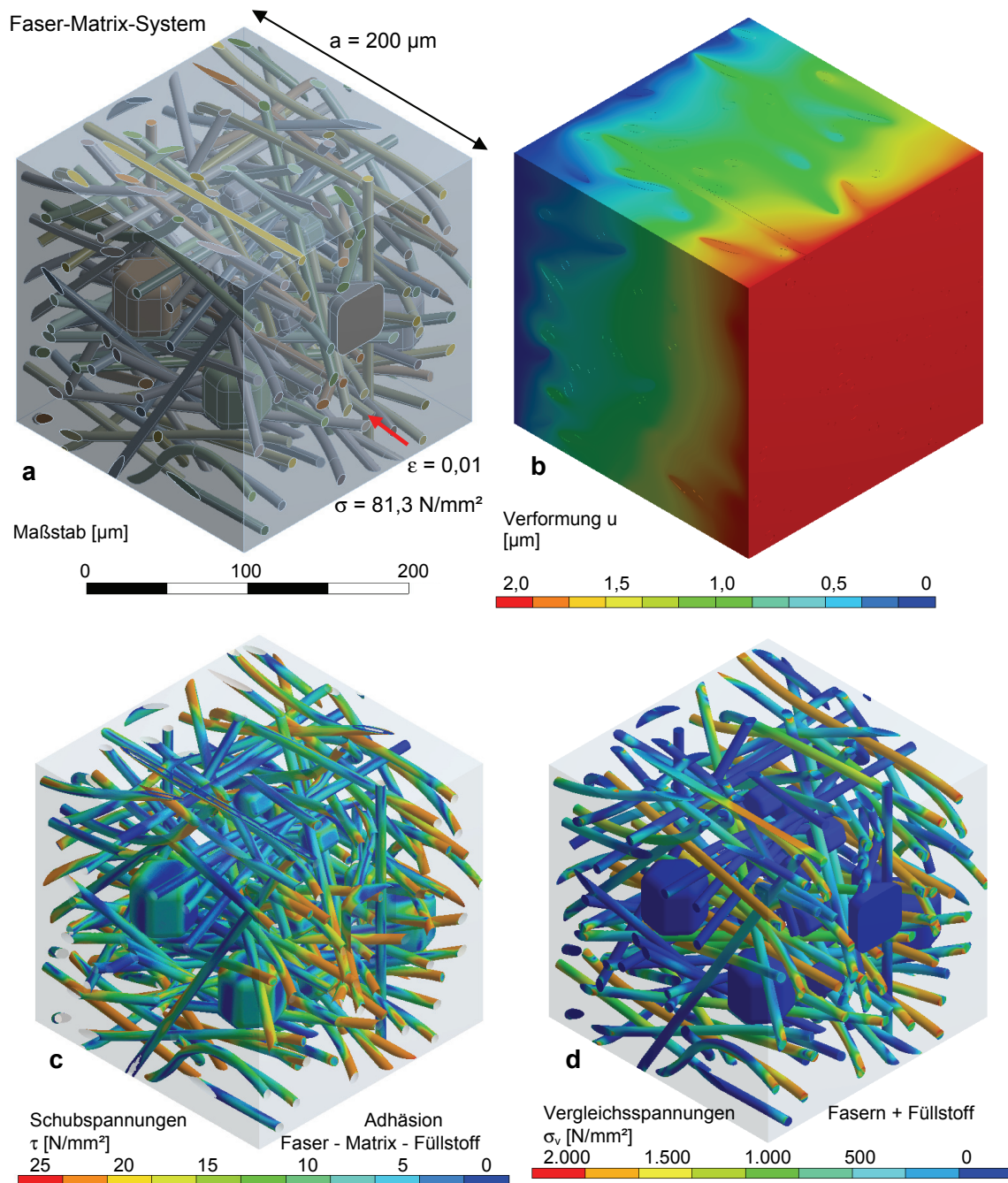


Abbildung 3.15: Ergebnisse der FEM-Analyse eines partikelgefüllten Faser-Matrix-Systems; a: geometrisches System mit Beanspruchung; b: Verformungen des Faser-Matrix-Füllstoff-Systems [μm]; c: Schubspannungen im Faser-Matrix-Füllstoff-System [N/mm^2]; d: Vergleichsspannungen in den Fasern und im Füllstoff [N/mm^2]

Die Steifigkeit dieses Systems auf Druckbeanspruchung wird mit:

■ $E = 8.125 \text{ N/mm}^2$

numerisch bestimmt. Experimentelle Untersuchungen an faserverstärkten und quarzpartikelgefüllten Klebstoffen zeigen, dass Faserverstärkungen die Zugfestigkeit verglichen mit ausschließlich quarzpartikelverstärkten Klebstoffen stark erhöhen können. Der Faserfüllgrad steht dabei immer in Konkurrenz zu dem maximal erzielbaren Partikelfüllgrad. Die Ver-

gleichsspannungen und -dehnungen des numerisch analysierten partikelgefüllten Faser-Matrix-Systems sind in Abbildung 3.16 dargestellt.

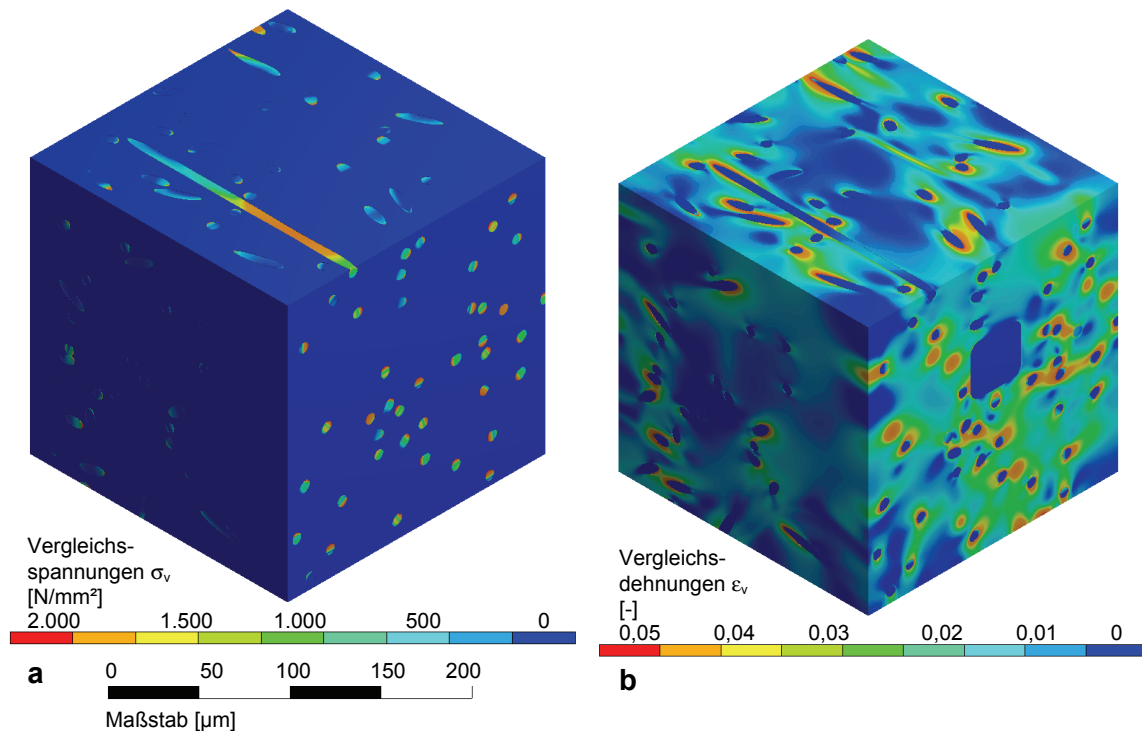


Abbildung 3.16: Ergebnisse der FEM-Analyse eines partikelgefüllten Faser-Matrix-Systems
a: Vergleichsspannungen im Faser-Matrix-Partikel-System [N/mm^2]
b: Vergleichsdehnungen im Faser-Matrix-Partikel-System [N/mm^2]

Die numerische Betrachtung zeigt, dass der Einsatz von Füllstoffen im Vergleich zu den Fasern nur zu einer geringfügigen Erhöhung der Steifigkeit führt. Die begrenzte geometrische Ausdehnung in Beanspruchungsrichtung ermöglicht nur eine Aufnahme vergleichsweise geringer Kräfte. In Beanspruchungsrichtung werden die Kräfte hauptsächlich durch die Fasern getragen. Trotzdem erhöht der Füllstoff die Steifigkeit des Systems, speziell bei hohen Füllgraden. Spezielle Untersuchungen zu partikelgefüllten Faser-Matrix-Systemen werden in Abschnitt 3.2 beschrieben.

3.1.5 Optimierung systemrelevanter Materialparameter

Die Optimierung systemrelevanter Materialparameter für die Herstellung leistungsfähiger KfV erfolgt in drei grundlegenden Bereichen:

- der Verwendung einer hochsteifen Klebstoffmatrix,
- der Verwendung einzelner Fasern mit möglichst geringem Faserdurchmesser und
- der Verbesserung der Adhäsionseigenschaften zwischen Fasern und Klebstoffmatrix.

Das Einbinden eines Füllstoffs in den KfV führt zu folgenden positiv wirkenden Effekten:

- die Erhöhung der Steifigkeit des Faserverbundsystems nach Aushärtung des Klebstoffs,
- die Verringerung von Entmischungseffekten und
- die Aufspaltung von Faserbündeln in Einzelfasern während des Mischvorgangs.

Bei der Wahl des Füllgrades von Fasern und Füllstoff in der Klebstoffmatrix sollten stets mechanische und verarbeitungsrelevante Parameter mit betrachtet werden. Geringe Füllgrade von Fasern und Füllstoff erzeugen nur geringfügige Steigerungen von Steifigkeit und Festig-

keit im KfV. Weiterhin besteht bei gering gefüllten Systemen die Gefahr einer Entmischung im Faser-Matrix-System während des Aushärtvorgangs. Bei einem zu hohen Füllgrad fallen die mechanischen Eigenschaften ebenfalls ab. Die vollflächige Benetzung der Fasern kann dann durch den Mischvorgang nicht mehr gewährleistet werden. Fehlstellen der Benetzung und Fasernester stellen nach dem Aushärten mechanische Kerbstellen dar. Durch die Faserzugabe steigt die Viskosität des unausgehärteten KfV sprunghaft an. Das führt zu einer starken Abrasionsneigung des KfV in den Verarbeitungswerkzeugen. In einem aktuellen Forschungsprojekt werden Untersuchungen hinsichtlich optimaler Füllgrade in faserverstärkten Klebstoffen und deren Auswirkung auf die Verarbeitbarkeit geführt (Werner, et al., 2011).

Der Faservolumenanteil und die Geometrie der Fasern üben einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des KfV, insbesondere der Steifigkeit und Festigkeit, aus. Abbildung 3.17 zeigt Bruchflächen unterschiedlicher Faser-Matrix-Systeme nach einem Versagen infolge Zugbeanspruchung. Es ist zu erkennen, dass die unterschiedlichen Fasertypen und -geometrien sehr unterschiedliche mechanische Effekte im Faser-Matrix-System hervorrufen.

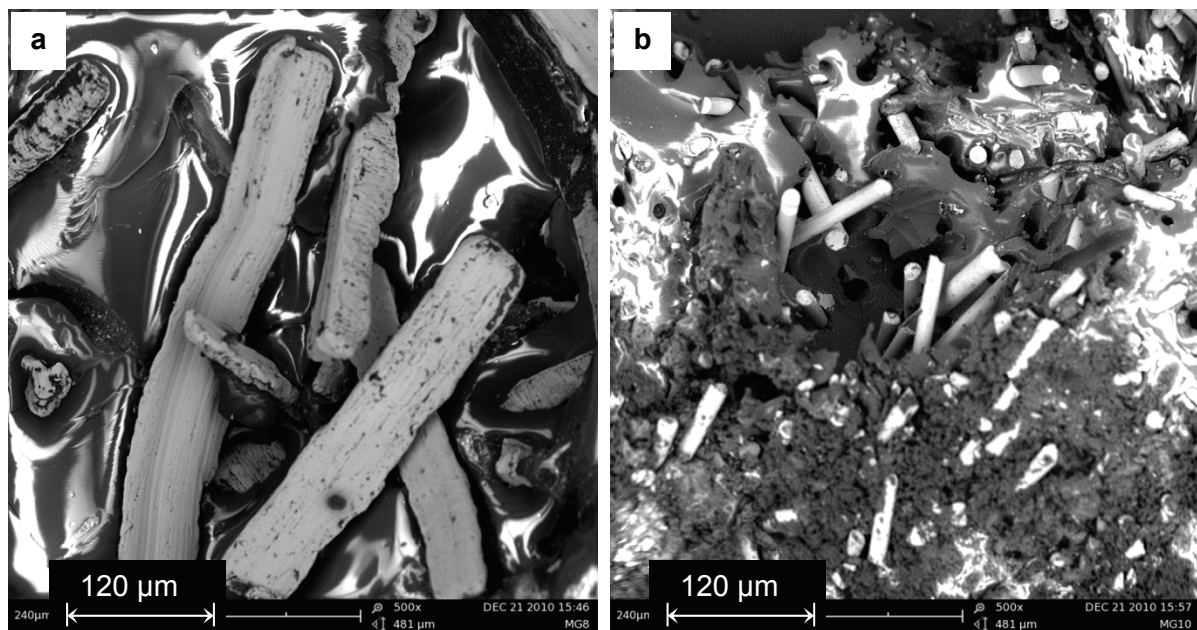


Abbildung 3.17: Bruchflächen adhäsiv wirkender Faser-Matrix-Systeme; a: Stahlfaser-verstärktes Epoxidharzsystem; b: Glasfaser-verstärktes Epoxidharzsystem

Die in Abbildung 3.17a dargestellten hochlegierten Stahlfasern weisen sehr ungünstige geometrische Verhältnisse U/A auf. Bei den auf der rechten Abbildung dargestellten Glasfasern sind die geometrischen Verhältnisse der Fasern verglichen mit den hochlegierten Stahlfasern günstiger. Die unterschiedlichen Fasergeometrien führen zu verschiedenartigen Bruchflächenausbildungen. Fasern mit großem Durchmesser können nicht bis zu ihrer mechanischen Festigkeit beansprucht werden, da die dafür notwendigen Adhäsionskräfte zwischen Faser und Matrix durch die Klebverbindung nicht erzeugt werden können. Das deckt sich auch mit den ingenieurmäßigen Betrachtungen zu Faserwerkstoffen, die in Abschnitt 3.1.2 dargestellt sind.

3.1.6 Metallfaser-verstärkte Klebstoffe

Ausgehend von den Erfahrungen über stahlfaserbewehrte Betonarten (Wietek, 2010) werden Untersuchungen an metallfaserbewehrten Epoxidharzklebstoffen durchgeführt. Die Ergebnisse der geführten Untersuchungen sind in diesem Abschnitt dargestellt.

Die Herstellung eines metallfaserbewehrten Epoxidharzklebstoffes erfolgt in zwei Schritten:

- dem Anmischen und Homogenisieren von Harz und Härter und
- dem Einmischen der Metallfasern.

In Abhängigkeit der Fasergeometrie können hohe Faserfüllgrade erzielt werden. Während der Beimengung der Fasern in das Epoxidharz entsteht nur eine geringe Anzahl von Lufteinschlüssen in der Matrix. Abbildung 3.18 zeigt die Oberfläche eines stahlfasergefüllten Epoxidharzes. Die Verteilung der Fasern in der Klebstoffmatrix ist kurz nach dem Mischvorgang sehr homogen. Der große Dichteunterschied zwischen Fasern und Matrix führt zu einem schwerkraftbedingtem Absinken der Fasern innerhalb der Klebstoffmatrix. Bei teilgefüllten Systemen führt das zu einer Entmischung des Faser-Matrix-Systems während der Aushärtung. Metallfaserbewehrte Klebstoffe auf Basis niedrigviskoser Epoxidharze können daher sinnvoll nur mit gesättigtem Faserfüllgrad hergestellt werden. Die Fasern stehen dann in direktem Kontakt zueinander. In Punkten, in denen sich die Fasern kreuzen, entsteht eine hohe Kerbwirkung, die bei mechanischer Beanspruchung einen Riss initiieren kann.

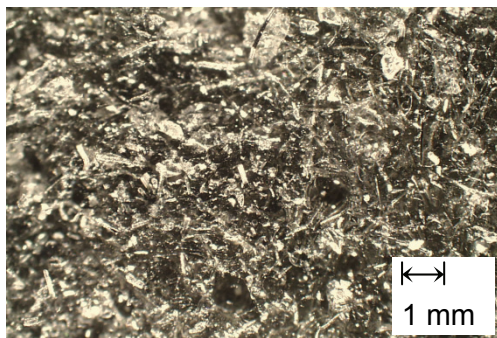


Abbildung 3.18: Oberfläche eines Stahlfaser-gefüllten Epoxidharzes

Ein wesentliches Problem bei der Entwicklung von metallfaserverstärkten Klebstoffsystemen besteht im ungünstigen U/A Verhältnis des Faserquerschnitts. Metallfasern werden häufig durch spanende Prozesse hergestellt, was zu einem technologiebedingtem Mindestdurchmesser der Fasern führt. Daraus entsteht für die erforderliche Adhäsionskraft zwischen Fasern und Matrix eine sehr hohe Anforderung. Industriell hergestellte, mit Primern vorbehandelte Metallfasern sind jedoch momentan nicht verfügbar. Daher besteht nur die Möglichkeit, möglichst lange Metallfasern einzusetzen, um die Schubspannungen zwischen Fasern und Matrix zu reduzieren. In den Bruchflächen der Faser-Matrix-Systeme konnte jedoch nur ein Adhäsionsbruch zwischen Fasern und Matrix beobachtet werden. Typische Bruchformen metallfaserverstärkter Epoxidharzklebstoffe sind in Abbildung 3.19 dargestellt.

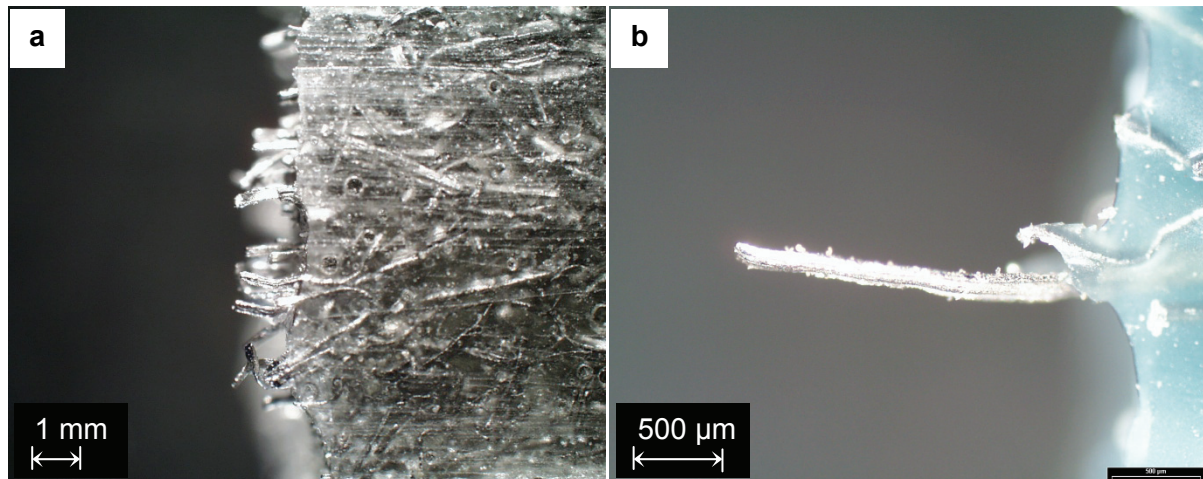


Abbildung 3.19: Bruchkante von stahlfaserbewehrtem Epoxidharz nach Zugbeanspruchung
 a: Bruchkante eines hochsteifen Epoxidharzklebstoffes; b: Bruchkante eines mittelsteifen Epoxidharzsystems

3.1.7 Glasfaser-verstärkte Klebstoffe

In diesem Abschnitt werden Untersuchungsergebnisse dargestellt, die die Herstellung und mechanische Analyse der glasfaser-verstärkten-Klebstoffe betreffen. Glasfasern werden als Verstärkungswerkstoffe in vielen unterschiedlichen Konfigurationen mit und ohne Schlichtepräparation angeboten. Eine Übersicht unterschiedlicher Glasfasern wird im Anhang in Abschnitt A.5.2 gegeben. Glasfasern sind, verglichen mit anderen Fasertypen, relativ dünn. Das daraus entstehende relativ hohe und damit günstige U/A-Verhältnis wirkt sich reduzierend auf die Schubbeanspruchungen in der Adhäsionsschicht aus. Dennoch ist der mittlere Faserdurchmesser mit $d \approx 20 \mu\text{m}$ ca. 3-mal größer als bei Kohlenstofffasern.

Ein Nachteil der Glasfaser ist seine relativ geringe Steifigkeit ($E = 70.000 \text{ N/mm}^2$), wodurch sich die resultierende Steifigkeit des faserverstärkten Klebstoffes nicht so effektiv steigern lässt, wie z. B. mit Kohlenstofffasern. Zudem sind alle erhältlichen Kurzschnittglasfasern, die mit einer Schlichte präpariert sind, durch den Schlichtenauftrag zu Faserbündeln verklebt. Diese Faserbündel lassen sich nur schwer in einzelnen Fasern auftrennen, ohne dass diese brechen. Der in Abschnitt 2.2.2 auf Seite 21 beschriebene minimale Biegeradius einer Glasfaser ist dabei wesentlich größer als bei Kohlenstofffasern. Die Faserbündelung wirkt sich auf das tatsächlich vorhandene U/A-Verhältnis ebenfalls ungünstig aus. An den in Abbildung 3.20 dargestellten Bruchkanten von glasfaserverstärkten Epoxidharzklebstoffen ist zu erkennen, dass die Glasfasern infolge der Zugbeanspruchung aus der Klebstoffmatrix herausgezogen wurden. Die Fasern liegen in den mit Schlichte präparierten Bündeln vor, die durch den Mischvorgang nicht aufgelöst werden konnten. Damit liegt ein Adhäsionsversagen zwischen den Glasfasern und der Klebstoffmatrix vor. Die Festigkeit der Glasfasern kann in dem faserverstärkten Klebstoff nicht effektiv genutzt werden.

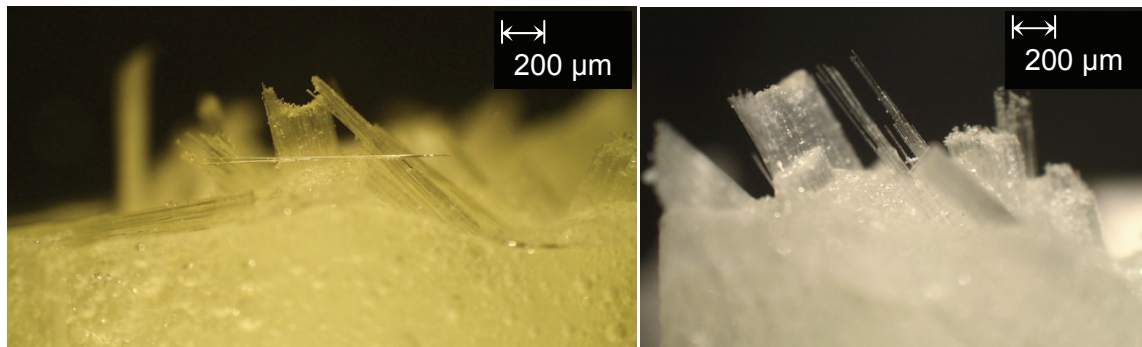


Abbildung 3.20: Bruchkante eines glasfaserverstärkten Epoxidharzklebstoffs nach Zugbeanspruchung

Die Verwendung von gemahlenen Glasfasern als Einzelfasern ohne Schlichtepräparation mit Faserlängen zwischen $50\text{ }\mu\text{m} \leq L \leq 350\text{ }\mu\text{m}$ führt bei hohen mechanischen Beanspruchungen wiederum zu einem Adhäsionsversagen zwischen Glasfasern und Matrix. Das liegt zum einen an dem geringen Adhäsionsvermögen der Glasoberfläche zum anderen sind die Lasteinleitungsbereiche für die Kraft in die Faser sehr klein. Die Verwendung längerer Fasern führt zu Verarbeitungsproblemen und Beschränkungen hinsichtlich eines maximalen Faserfüllgrades in der Matrix. Weiterhin können Mischungsvorgänge in der unausgehärteten Faser-Klebstoff-Matrix zu einem Brechen der Glasfasern führen. Damit sind die Möglichkeiten zur Verwendung optimaler Glasfaservarianten stark eingeschränkt.

Glasfasern, die mit einer Schlichte beschichtet sind und als Einzelfasern vorliegen, stellen eine wirkungsvolle Möglichkeit dar, die Schubspannungen zwischen Glasfaser und Matrix zu reduzieren und gleichzeitig die Adhäsion zwischen Glasfasern und Klebstoffmatrix zu verbessern. Diese Variante der Faserverstärkung wird in der Spritzgussindustrie angewandt und stellt dort eine leistungsfähige Verstärkungsform dar. Glasfaserverstärktes Polypropylen wird dort als mechanisch hochbeanspruchbarer Werkstoff in einem sehr breiten Anwendungsspektrum eingesetzt (Henn, 1998; Johannaber, et al., 2004).

3.2 Untersuchungen ausgewählter Kohlenstofffaser-verstärkter KfV

Die Anwendung von Kohlenstofffasern zur Herstellung faserverstärkter Klebstoffe bietet gegenüber anderen Fasermaterialien einige herausragenden Vorteile. Die Fasern haben einen sehr geringen Durchmesser von $d \approx 7\text{ }\mu\text{m}$ und weisen zudem hohe Steifigkeiten und sehr hohe Festigkeiten auf. Das hohe U/A-Verhältnis der Fasern führt zu einer großen Benetzungsfläche der Klebstoffmatrix, bezogen auf die Querschnittsfläche der Fasern. Das wirkt reduzierend auf die Schubspannungen in der Adhäsionsschicht zwischen Klebstoff und Fasern. Die Fasern haben, verglichen mit Glasfasern, einen sehr geringen minimalen Biegeradius und sind deshalb während der Verarbeitung der unausgehärteten Faser-Klebstoffmatrix weniger bruchanfällig als z. B. Glasfasern. In den folgenden Abschnitten werden wesentliche Eigenschaften von zwei ausgewählten kohlenstofffaser-verstärkter-KfV mithilfe numerischer und experimenteller Untersuchungen beschrieben. Nach der im folgenden Abschnitt 3.2.1 dargestellten grundlegenden Systembeschreibung der beiden KfV werden im Abschnitt 3.2.2 die mechanischen Eigenschaften der KfV diskutiert. Wesentliche Randbedingungen der Systemverträglichkeit der einzelnen Bestandteile des KfV untereinander werden in Form von Adhäsionsbetrachtungen, Temperaturdehnungseffekten und Aushärtungsbedingungen in den Abschnitten 3.2.3 bis 3.2.5 dargestellt.

3.2.1 Systembeschreibung Kohlefaser-verstärkter Klebstoffe

Für unterschiedliche Einsatzbereiche werden zwei in den Verarbeitungseigenschaften grundsätzlich verschiedene Systeme, niedrigviskos und hochviskos, entworfen. Dies erfolgte im Rahmen eines AiF-geförderten Forschungsvorhabens in Zusammenarbeit mit iKTZ – innovative Klebtechnik Zimmermann und der Rudolstädter Systembau GmbH. Bruchflächen dieser beiden unterschiedlichen Systeme sind in Abbildung 3.21 dargestellt.

Ein niedrigviskoses System, das im Folgenden als **KFV-A** bezeichnet wird, basiert auf einem niedrigviskosem 2K-Epoxidharzklebstoff und wird kombiniert mit gemahlenen Kohlenstofffasern die eine durchschnittliche Länge $50\ \mu\text{m} < L < 150\ \mu\text{m}$ aufweisen. Die Faserverstärkung führt zu einem deutlichen Zuwachs an Steifigkeit und Zugfestigkeit, verglichen mit dem unverstärkten Klebstoff. Das System kann als adhäsiv wirkender Werkstoff vor allem in kleinvolumigen Bereichen vielseitig eingesetzt werden.

Ein hochviskoses System, das im Folgenden als **KFV-B** bezeichnet wird, basiert auf einem mittelviskosen 2K-Epoxidharzklebstoff, dem zusätzlich zu Kohlenstoff-Kurzschnittfasern 3 mm $< L < 6\text{ mm}$ Quarzsand als Füllstoff beigemischt wird. Dieses System bietet aufgrund seiner guten mechanischen Eigenschaften vor allem bei großvolumigen Anwendungen Vorteile. Diese sind charakterisiert durch hohe Steifigkeit und Zugfestigkeit, kombiniert mit einer geringen Schwindneigung (Werner, 2008).

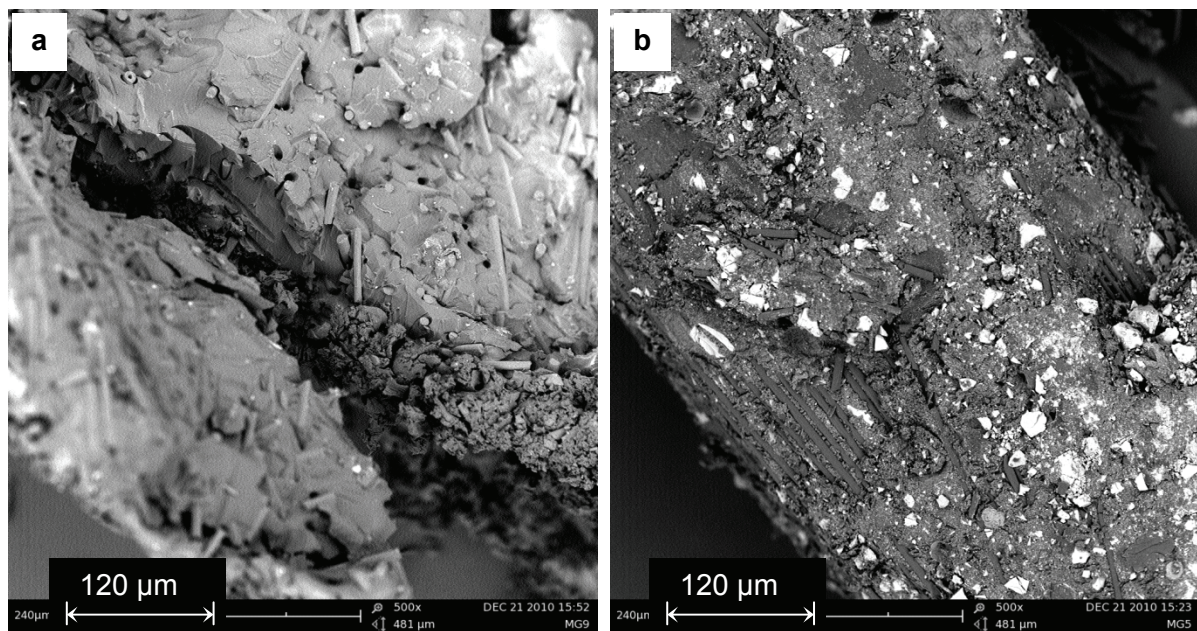


Abbildung 3.21: Bruchflächen adhäsiv wirkender Faser-Matrix-Systeme; a: Kohlenstofffaser-verstärktes Epoxidharzsystem; KFV-A; b: Kohlenstofffaser-quarzsand-gefülltes Epoxidharzsystem; KFV-B

Bei diesen Systemen werden die Trageigenschaften durch die qualitative und quantitative Zusammensetzung der Ausgangswerkstoffe definiert:

- Klebstoff – Adhäsionseigenschaft, mechanische Grundeigenschaften,
- Fasern – Erhöhung von E-Modul und Zugfestigkeit, geringe Erhöhung der Druckfestigkeit,
- Füllstoff – Erhöhung E-Modul und Druckfestigkeit, geringe Steigerung der Zugfestigkeit.

Die mechanischen Kennwerte werden für KFV-A und KFV-B in verschiedenartigen Experimenten ermittelt. Weiterhin werden verarbeitungstechnische Gesichtspunkte hinsichtlich verschiedener Anwendungskriterien untersucht.

Durch eine Variation der Anteile von Fasern und Füllstoff in der Klebstoffmatrix können die Eigenschaften des faserverstärkten Klebstoffs gezielt beeinflusst werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich bei einer Faser- oder Partikelverstärkung über den optimalen Füllgrad hinaus die Materialeigenschaften des KfV verschlechtern, da eine allseitige Benetzung der Verstärkungsmaterialien mit dem Klebstoff nicht mehr erreicht wird.

Zweikomponentiges System KfV-A

Das zweikomponentige System KfV-A besteht aus einem sehr niedrigviskosen, bei Raumtemperatur aushärtendem 2K-Epoxidharzklebstoff. Die Aushärtedauer des verwendeten Klebstoffs ist stark temperaturabhängig. Abbildung 3.22 zeigt die Abhängigkeit zwischen Temperatur und Härtungsdauer des Epoxidharzklebstoffes von KfV-A für verschiedene Grundfestigkeiten.

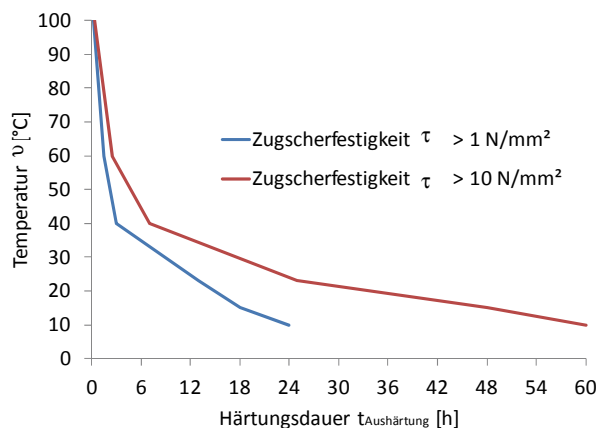


Abbildung 3.22: Abhängigkeit von Härtungsdauer und Temperatur des Klebstoffs für KfV-A zum Erreichen verschiedener Scherfestigkeiten (Huntsmann, 2004)

Die geringe Viskosität des Klebstoffs bildet die Grundlage zur Erzeugung möglichst hoher Faserfüllgrade, bei denen auch sichergestellt ist, dass alle Fasern vollständig benetzt und damit im Faser-Matrix-System mechanisch eingebunden sind. Allerdings stellt die geringe Viskosität auch einen Nachteil dar, da bei teilgefüllten Systemen es zu einer Entmischung infolge der Dichteunterschiede zwischen Fasern und Matrix während des Aushärtvorgangs kommen kann. Bei der Faserauswahl muss ein Kompromiss zwischen mechanischen Eigenschaften und Verarbeitungseigenschaften gefunden werden. Die Fasern müssen einerseits eine ausreichende Länge besitzen, um mechanisch aktiviert werden zu können. Andererseits ermöglichen kurze Faserlängen ein gutes Mischverhalten und wirken sich positiv auf die Verarbeitbarkeit des Faser-Klebstoff-Gemisches aus. Durch die Verwendung kürzerer Fasern kann so der Faserfüllgrad effektiv gesteigert werden.

Die Ausgangsviskosität der homogenisierten unausgehärteten Klebstoffmatrix beträgt:

- $\eta_0 \approx 150 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Nach dem Einmischen der Fasern erhöht sich die Viskosität (je nach Füllgrad) auf:

- $\eta_1 \approx 500 \dots 1500 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Es kann ein überproportionales Ansteigen der Viskosität für Fasergehalte $M_{\text{Faser}} > 25 \text{ M}\%$ festgestellt werden. Mechanische Untersuchungen zeigen oberhalb dieses Fasergehalts einen Abfall der Zugfestigkeit.

Bei Fasergehalten M_{Faser} zwischen 20 und 25 % Masse ist für äquivalente Zugscherfestigkeiten ein Anstieg der erforderlichen Härtungsdauer von ca. 100 % zu beobachten.

Die mechanischen Grundeigenschaften des unverstärkten Epoxidharzes von KfV-A und dem faserverstärkten KfV-A sind in Tabelle 3-1 aufgeführt.

	2K-Epoxidharz- klebstoff für KfV-A	KfV-A: 2K-Epoxidharzklebstoff gefüllt mit 20 Masse % Kohlenstofffasern
E-Modul E [N/mm ²]	1.500	3.000
Schubfestigkeit τ [N/mm ²]	30	50
Zugfestigkeit f_{u+} [N/mm ²]	35	100
Druckfestigkeit f_{u-} [N/mm ²]	35	120
Dichte ρ [g/cm ³]	1,1	1,24
Wärmedehnung α_T [1/K]	$6,0 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-5}$
Schrumpfmaß V_s [%]	0,7%	0,3%

Tabelle 3-1: Mechanische Eigenschaften des unverstärkten Epoxidharzklebstoffes und des faserverstärkten KfV-A

Mehrkomponentiges System KfV-B

Das mehrkomponentige System KfV-B besteht aus drei verschiedenen Komponenten die, abhängig vom prozentualen Anteil im KfV, spezifische mechanische Eigenschaften generieren. Der verwendete Epoxidharzklebstoff ist ein mittellviskoses, bei Raumtemperatur aushärtendes 2K-Epoxidharzsystem, dessen Viskosität stark temperaturabhängig ist. Abbildung 3.23 zeigt die Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur für den 2K-Epoxidharzklebstoff der für KfV-B eingesetzt wird.

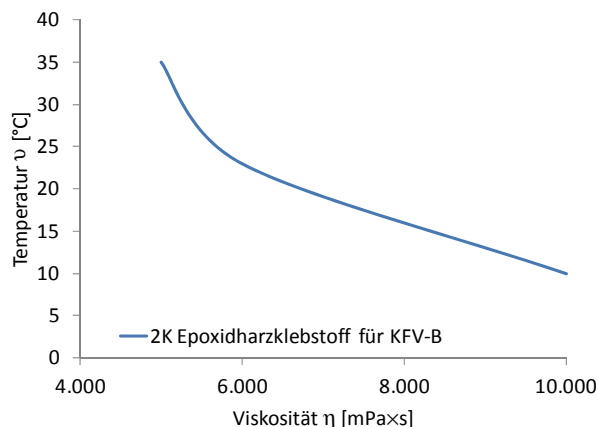


Abbildung 3.23: Zusammenhang zwischen Viskosität und Temperatur für den 2K-Epoxidharzklebstoff von KfV-B (Sika, 2003)

Als Verarbeitungstemperatur ist hinsichtlich einer optimalen Mischbarkeit der Einzelkomponenten eine Temperatur $\upsilon \approx 25$ °C anzustreben. Die mechanischen Grundeigenschaften des unverstärkten Klebstoffs für KfV-B sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

Die Modifikation des 2K-Epoxidharzklebstoffes mit SiO_2 -Partikeln führt in erster Linie zu einer Erhöhung der inneren Steifigkeit und Druckfestigkeit. Die Zugabe von 30 $V_{\text{Vol}}\%$ bzw. 45 $M_{\text{Partikel}}\%$ SiO_2 führt nach der Aushärtung des Partikel-Klebstoff-Gemisches zu mechanischen Eigenschaften, die in Tabelle 3-2 dargestellt sind.

Die Mischviskosität nimmt durch die Füllung mit SiO_2 -Partikeln stark zu. Nach dem Vermischen der einzelnen Komponenten beträgt die Viskosität $\eta_1 \geq 100.000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ bei $\nu = 25^\circ\text{C}$ mit thixotropen Eigenschaften. Entmischungsvorgänge während der Aushärtung konnten infolge der hohen Viskosität nicht beobachtet werden. Das Schwindmaß wird durch die SiO_2 -Partikel stark reduziert. Abbildung 3.24 zeigt eine Bruchfläche des SiO_2 gefüllten Epoxidharzsystems infolge von Zugbeanspruchung. Die SiO_2 -Partikel lösen sich aus dem Matrix-System heraus und es erfolgt ein Adhäsionsversagen zwischen den Partikeln und der Epoxidharzmatrix.

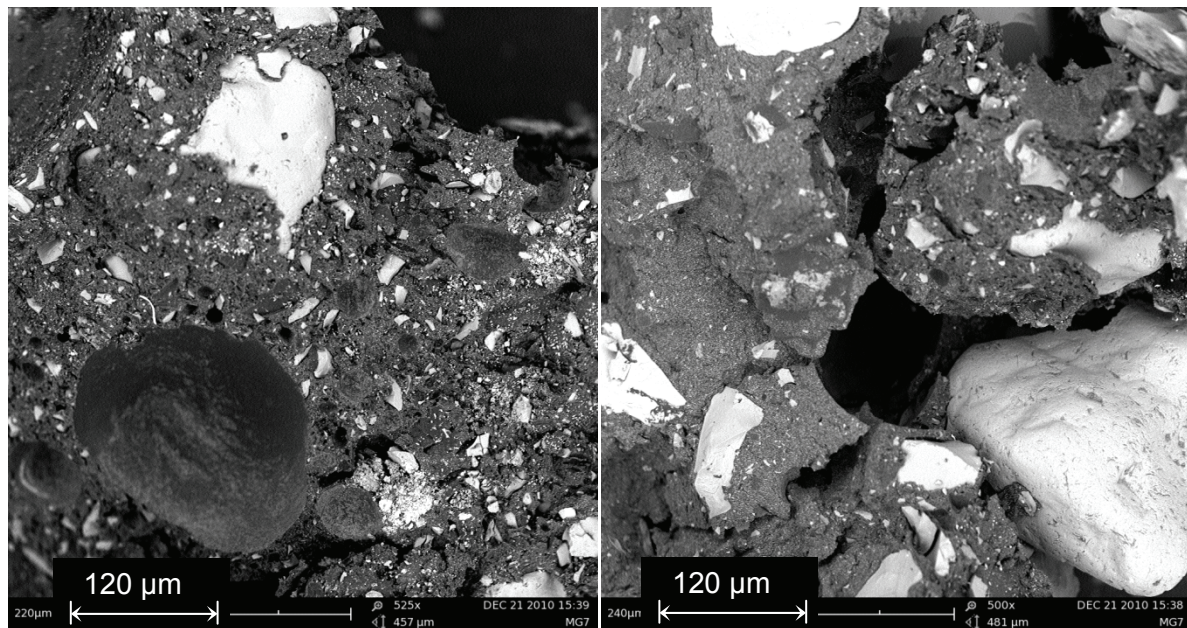


Abbildung 3.24: Bruchfläche des 2K-Epoxidharzes gefüllt mit SiO_2 nach Zugbeanspruchung

Das Hinzufügen von Kohlenstofffasern in die Klebstoff- SiO_2 -Matrix führt zu einem deutlichen Anstieg der Viskosität. Der KfV-B ist von seiner Viskosität her vergleichbar mit faserverstärkten Spritzgussystemen, die Viskositäten $\eta_2 \geq 10^6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ aufweisen. Die Faserbeimengung führt zu thixotropen Eigenschaften, die verarbeitungstechnisch genutzt werden können und speziell für die Applikationstechnik von Vorteil sind.

	2K-Epoxidharzklebstoff für KfV-B	2K-Epoxidharzklebstoff gefüllt mit SiO_2 für KfV-B	KfV-B: 2K-Epoxidharzklebstoff gefüllt mit SiO_2 und 5 M% Kohlenstofffasern
E-Modul E [N/mm^2]	2.000	10.000	12.500
Schubfestigkeit τ [N/mm^2]	12	20	50
Zugfestigkeit f_{u+} [N/mm^2]	14	14	65
Druckfestigkeit f_{u-} [N/mm^2]	30	95	110
Dichte ρ [g/cm^3]	1,3	1,65	1,65
Wärmedehnung α_T [$1/\text{K}$]	$4,5 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$
Schrumpfmaß V_s [%]	0,1%	0,04%	0,04%

Tabelle 3-2: Mechanische Eigenschaften unterschiedlicher Modifikationen von KfV-B

Die Viskosität nimmt dabei mit steigender Mischdauer stark zu, da die SiO_2 -Partikel, die anfänglich in Faserbündeln vorliegenden Kohlenstofffasern auftrennen. Durch diesen Effekt werden die Faserbündel aufgerieben und es entsteht ein sehr homogenes KfV-Gemisch.

Für den Verarbeitungsprozess bedeutet dies einen höheren Aufwand während des Mischens und Einbringens des Klebstoffs, da die stark ansteigende Viskosität die allseitige Benetzung der Fasern erschwert. Nach dem Einbringen des KfV in die Klebfuge stellt die hohe Viskosität des KfV einen Vorteil dar, da der KfV eine sofortige Formstabilität aufweist. Dieses Verhalten wird durch die thixotrope Eigenschaft zusätzlich unterstützt, da bei Abnahme der Fließgeschwindigkeit die Viskosität des KfV stark ansteigt. Das ermöglicht es, den KfV auch in Zwangspositionen (z. B. Überkopfpositionen) einzubringen. Bei kleinen Klebquerschnitten kann die hohe Viskosität des KfV die Verarbeitbarkeit andererseits stark einschränken.

Die mechanischen Eigenschaften von KfV-B können mittels einer Variation von SiO_2 -Partikeln und Kohlenstofffasern gesteuert werden. Der Füllgrad von Kohlenstofffasern und SiO_2 -Partikeln kann jedoch nur begrenzt gesteigert werden, da sich die Verarbeitbarkeit bei hohem Füllgrad stark verschlechtert.

Abbildung 3.25 zeigt Oberfläche und Bruchfläche der faserverstärkten Klebstoffvariante KfV-B. Der Kohlenstofffasergehalt ist hierbei gering, dennoch kann eine signifikante Steigerung der Zugfestigkeit gegenüber dem unverstärkten Klebstoff nachgewiesen werden.

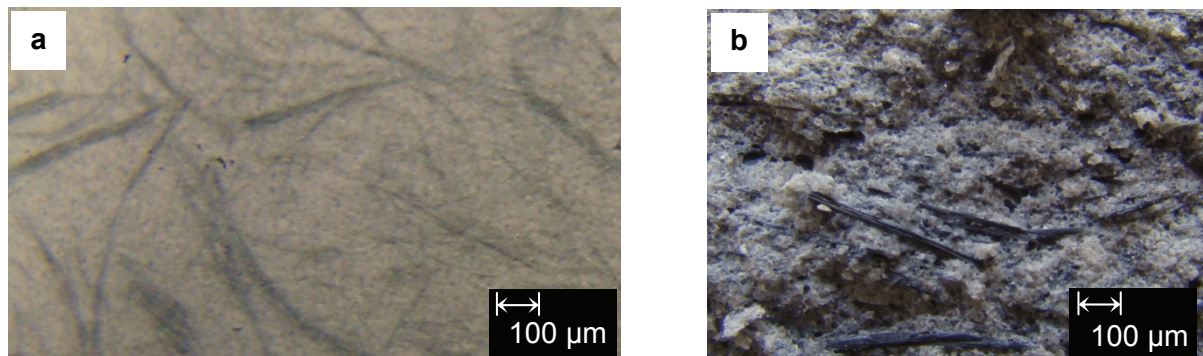


Abbildung 3.25: KfV-B; a: Ansicht der Oberfläche; b: Bruchfläche nach Zugbeanspruchung

Bei der Strukturanalyse von KfV-B ist ein hoher Füllgrad aus Faserverstärkung und Quarzsand zu erkennen. Abbildung 3.26 zeigt unterschiedliche Schliffbilder des KfV-B. Bereiche, in denen unverstärkter Klebstoff vorliegt, haben einen sehr geringen Anteil bezogen auf die Gesamtfläche.

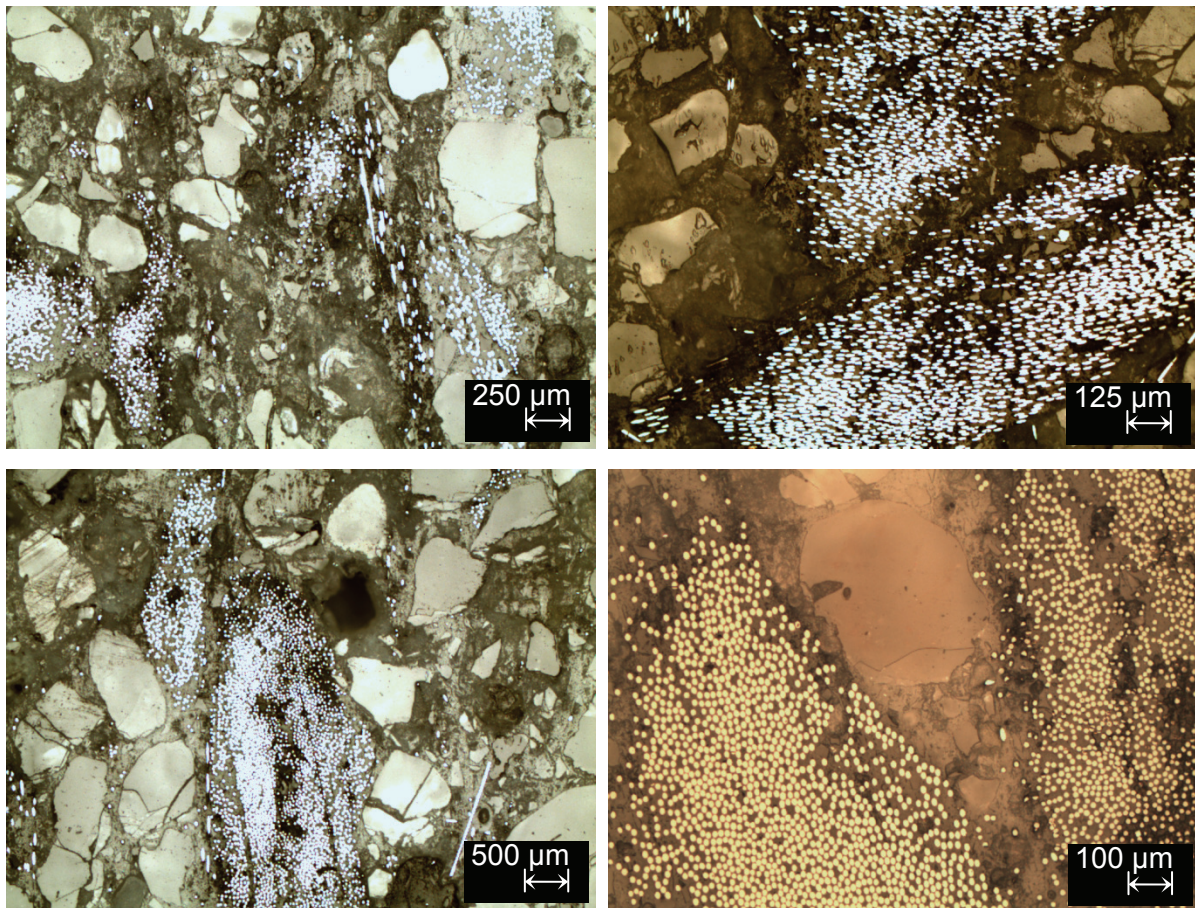


Abbildung 3.26: Schliffbilder von KfV-B in unterschiedlichen Vergrößerungen

Die Kohlenstofffasern liegen in Faserbündeln vor und werden von SiO₂-Partikeln eingegrenzt. Das daraus entstehende Tragverhalten ist gekennzeichnet durch eine hohe Steifigkeit, die durch die SiO₂-Partikel generiert wird. Daneben führt die Faserverstärkung zu einer hohen Zugfestigkeit, die jedoch durch den Faseranteil begrenzt wird. Die Substitution von SiO₂-Partikeln zugunsten eines höheren Faseranteils führt zu einem KfV mit geringerer Steifigkeit aber höherer Zugfestigkeit.

3.2.2 Mechanische Grundeigenschaften

Druck- und Zugeigenschaften

Die mechanischen Grundeigenschaften, E-Modul und Festigkeit, werden in Zug- und Druckversuchen bestimmt. Für die Durchführung von Zugversuchen werden Probekörper in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4 (Deutsches Institut für Normung, 1997) hergestellt und in einem Zugversuch getestet. Abbildung 3.27 zeigt einen Zugstab aus KfV-B nach dem Probenbruch.



Abbildung 3.27: KfV-B nach Bruch; a: Zugstab; b: Bruchdetail

Die Bruchfläche des KfV-B nach einer Zugbeanspruchung ist in Abbildung 3.28 dargestellt. In dem Bruchbild sind die Kohlenstofffasern zum Teil aus der Matrix herausgezogen, zum Teil liegt aber auch kohäsives Versagen der Fasern vor. Die Bruchausbildung ist aufgrund der SiO_2 -Partikel stark zerklüftet. Der Probenbruch ist jeweils in Bereichen aufgetreten, die Kerbstellen aufwiesen, oder in Unstetigkeitsbereichen nahe der Ausrundung des Zugstabes.

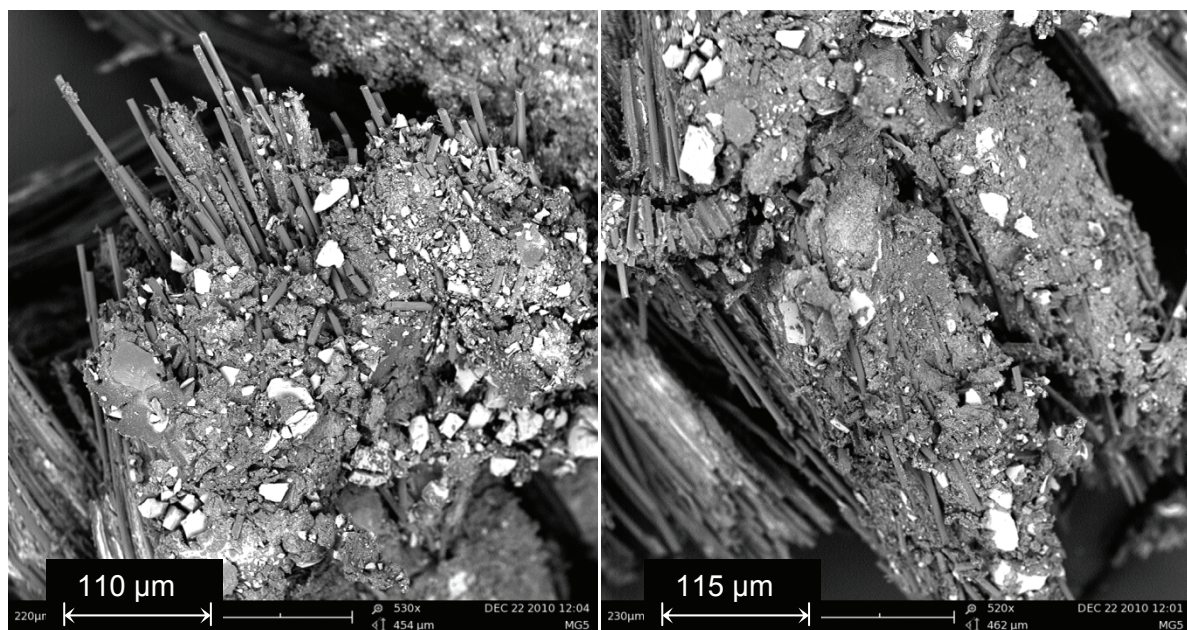


Abbildung 3.28: Bruchfläche von KfV-B nach Zugbeanspruchung

Während des Zugversuches wird die Längs- und Querdehnung über DMS ermittelt. Damit können unter Annahme eines weitgehend elastischen Materialverhaltens E-Modul, Querdehnzahl und Schubmodul des KfV berechnet werden.

Eine numerische Betrachtung dieser Versuche gestattet die Kalibrierung von mechanischen Materialmodellen. Mit diesen experimentell und numerisch ermittelten Daten ist es dann möglich, auch komplexe Systeme zu untersuchen. Ergebnisse einer numerischen Analyse eines Zugversuchs mit dem KfV-B sind in Abbildung 3.31 dargestellt. Wesentliche Eingangsparameter für diese Betrachtung sind:

- Geometrie des Probekörpers nach DIN EN ISO 527-4 (Deutsches Institut für Normung, 1997),
- $E = 12.000 \text{ N/mm}^2$, isotropes homogenes Materialmodell,
- nomineller Stabquerschnitt $b \times t = 10 \times 5 \text{ mm}^2 = 50 \text{ mm}^2$,
- Längskraft $F = 2.500 \text{ N}$, entspricht einer nominellen Längsspannung von $\sigma = 50 \text{ N/mm}^2$.

Im Ergebnis der numerischen Betrachtung kann ein weitgehend gleichförmiger Spannungsverlauf über die Zugstablänge abgelesen werden.

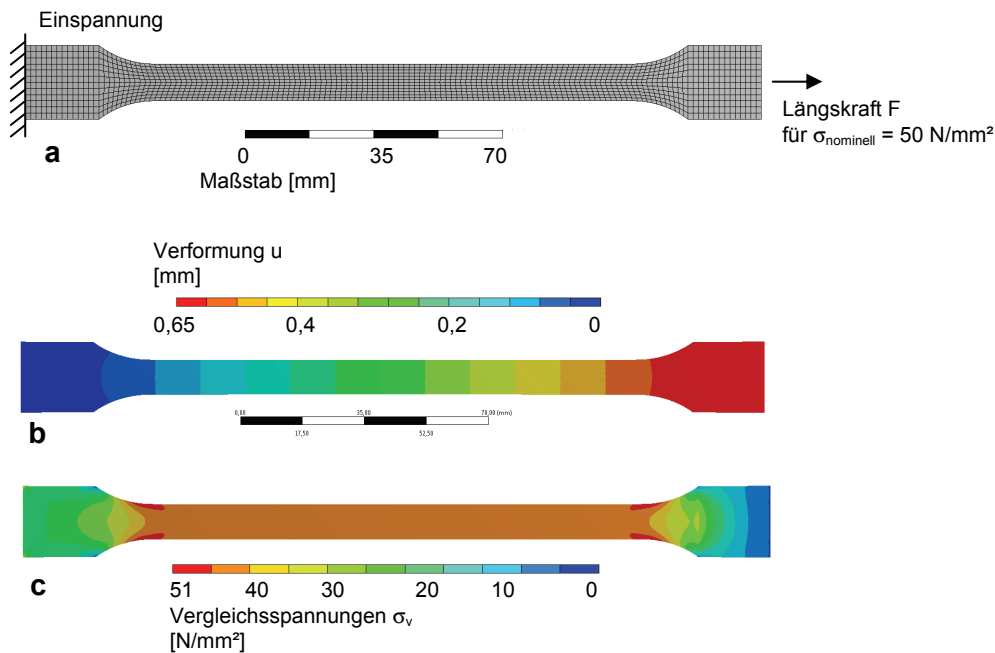


Abbildung 3.29: Ergebnisse der FEM-Analyse eines Zugversuchs am Probekörper nach DIN EN ISO 527-4: 1997-07 (Deutsches Institut für Normung, 1997) a: System mit aufgebrachtter Belastung; b: Verformungen infolge der Beanspruchung mit $\sigma_{\text{nominell}} = 50 \text{ N/mm}^2$; c: Vergleichsspannungen innerhalb des Zugstabes $[\text{N/mm}^2]$

Bei genauer Betrachtung der Lasteinleitungsbereiche des Zugstabes kann eine lokale Spannungsüberhöhung in den Bereichen der Kraftumlenkung festgestellt werden. Das wird besonders in der Abwicklung der Vergleichsspannung über die Stablänge sichtbar, die in Abbildung 3.30 dargestellt ist.

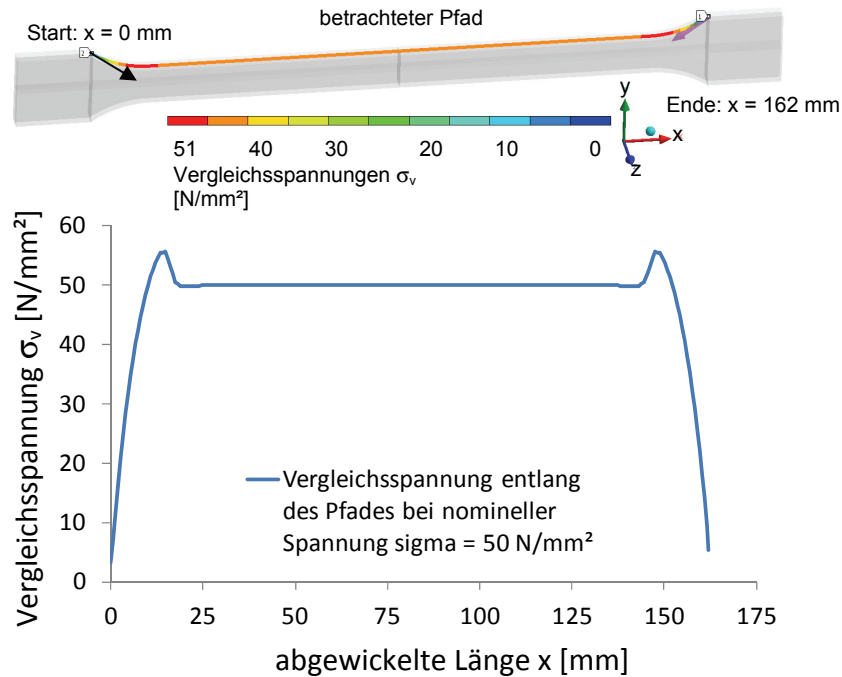


Abbildung 3.30: Ergebnisse der FEM-Analyse von Vergleichsspannung aufgetragen über die Länge des Probekörpers bei $\sigma_{\text{nominell}} = 50$ N/mm²

Die Höhe dieser Spannungskonzentration lässt sich durch die Wahl eines größeren Ausrundungsradius verringern. Vollständig vermieden werden kann diese Spannungsspitze geometriebedingt jedoch nicht. In experimentellen Untersuchungen ist häufig ein Bruch im Bereich der Ausrundung festzustellen, insbesondere wenn es sich um einen spröden Werkstoff handelt. Duktile Werkstoffe können diese Spannungskonzentration hingegen durch plastische Dehnungen ausgleichen. Daher ist bei duktilen Werkstoffen ein Versagen in den Lasteinleitungsbereichen seltener festzustellen.

Die Durchführung von Druckversuchen für KfV-Werkstoffe ist, verglichen mit den Untersuchungen an Zugproben von untergeordneter Bedeutung. Die Druckfestigkeit ist bei den betrachteten KfV generell höher als die Zugfestigkeit. Numerische Betrachtungen von Druckversuchen zeigen bei Versuchskörpern ohne Querdehnungsbehinderung einen vielschichtigen Spannungszustand. Im Bereich des Lasteintrags entstehen hohe Spannungskonzentrationen, die vor allem in querzugbeanspruchten Bereichen zu Initialrissen führen. Dann erfolgt ein sprödes Versagen. Ergebnisse einer numerischen Analyse eines Druckversuches an einem Quader mit den Abmessungen $b \times d \times h = 40 \times 40 \times 80$ mm³ und dem E-Modul $E = 12.000$ N/mm² sind in Abbildung 3.31 dargestellt.

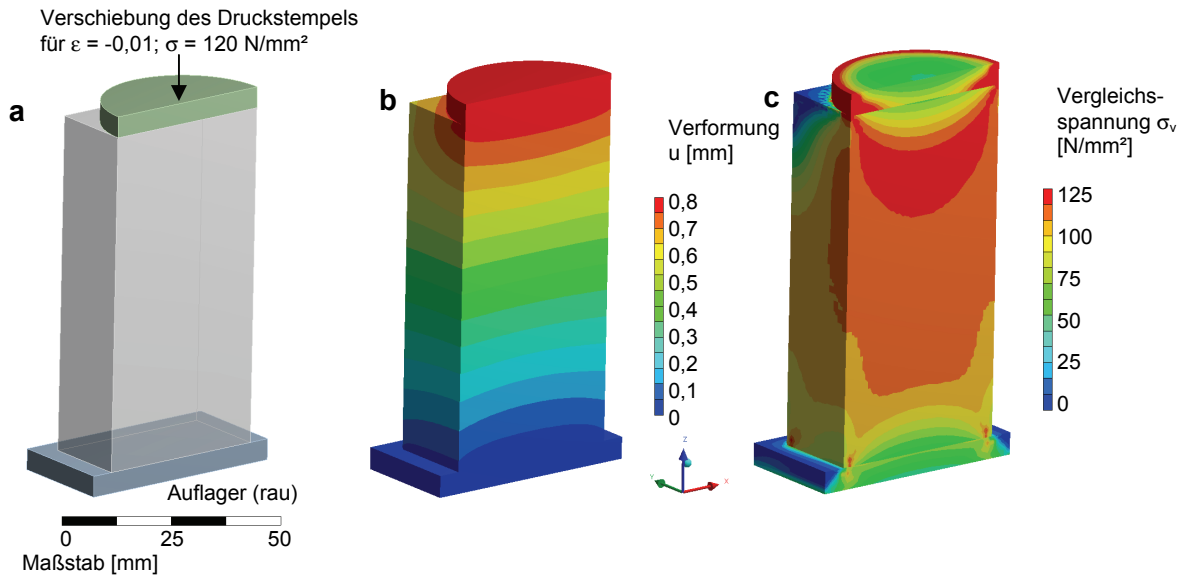


Abbildung 3.31: Ergebnisse der FEM-Analyse eines Druckversuches an einem KfV-Quader $b \times d \times h = 40 \times 40 \times 80 \text{ mm}^3$; a: System mit aufgebrachtter Stauchung $\epsilon = -0,01$; b: Verformungen innerhalb des KfV-Quaders [mm]; c: Vergleichsspannungen innerhalb des KfV-Quaders [N/mm^2]

Die Auswertung der numerischen Analyse zeigt hohe Spannungskonzentrationen speziell in den Randbereichen der Lasteinbringung. Daher sind insbesondere zur Ermittlung der mechanischen Grundeigenschaften, wie Steifigkeit und Querdehnzahl, Zugversuche besser geeignet.

Biegezugeigenschaften

Der Biegezugversuch stellt eine weitere Möglichkeit zur Charakterisierung der Materialeigenschaften von KfV dar. In den durchgeführten Versuchen werden Biegezugprüfkörper mit den Abmessungen

- $b \times d \times h = 10 \times 10 \times 130 \text{ mm}^3$ mit abgerundeten Ecken

und verschiedenen Materialkombinationen untersucht.

Der untersuchte Biegebalken hat einen Endauflagerabstand von $L = 100 \text{ mm}$. Die Biegezugeigenschaften werden mit den ermittelten Zugeigenschaften verglichen. Die Biegezugfestigkeit liegt im Mittel ca. 30 % über der Zugfestigkeit aus dem einaxialen Zugversuch. Die Oberflächenqualität der Biegezugproben war im Vergleich zu den Zugproben wesentlich höher, da die Probekörper in Quadratrohren aus Polypropylen hergestellt wurden. Weiterhin ist der Bereich, in dem maximale Zugbeanspruchungen auftreten, lokal begrenzt, was eine dem Größeneffekt bei Faserwerkstoffen ähnlichen festigkeitssteigernden Effekt hervorruft. Der Spannungsverlauf im Biegezugversuch ist, verglichen mit dem des einaxialen Zugversuches, grundlegend verschieden. Die Maximalspannung tritt nur in einem sehr begrenzten Bereich auf. Abbildung 3.32 zeigt einen Biegebalken aus KfV-B unmittelbar nach dem Bruch.

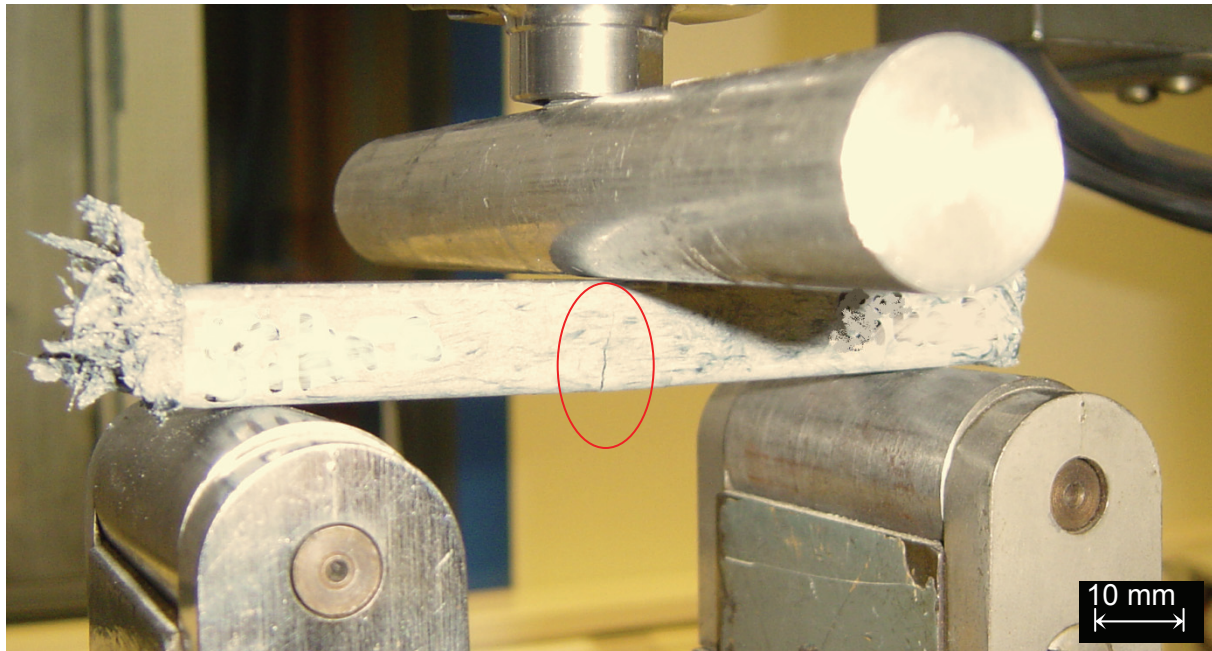


Abbildung 3.32: KfV-B nach erstem Anriss im 3-Punkt-Biegeversuch

Das Versagen der KfV ist analog zu den Zugversuchen geprägt von einem spröden Bruch. Unverstärkte Klebstoffe zeigen ein teilplastisches Last-Verformungs-Verhalten, der Bruch tritt erst bei deutlich größeren Verformungen auf. Abbildung 3.33 zeigt das Last-Verformungs-Verhalten eines unverstärkten Biegebalkens aus Epoxidharz und eines Biegebalkens aus KfV-A. Der verwendete Klebstoff ist in beiden Fällen gleich. Es ist ein deutlicher Unterschied in der Steifigkeit und dem Bruchverhalten zu erkennen.

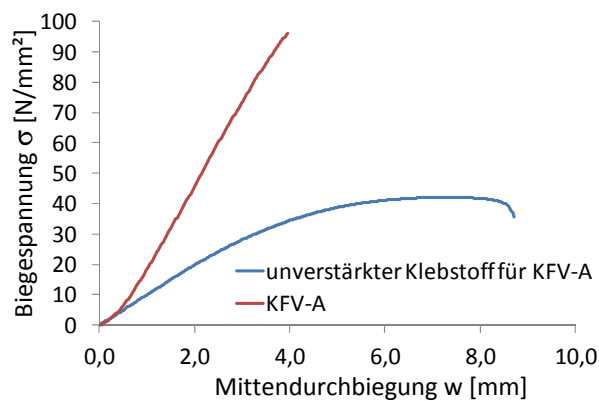


Abbildung 3.33: Vergleich der Biegeeigenschaften; blau: unverstärkter Klebstoff für KfV-A; rot: verstärkter Klebstoff KfV-A

Zur Verifizierung der experimentell ermittelten Versuchsergebnisse und den daraus ingenieurmäßig ermittelten Materialkennwerten

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad \text{und} \quad E = \frac{F_{\text{mitte}} \times L_{\text{Balken}}^3}{48 I_y \times w_{\text{mitte}}}$$

ermöglicht die numerische Analyse eine Kalibrierung der mechanischen Materialmodelle.

In Abbildung 3.34 sind die Ergebnisse einer numerischen Analyse eines 3-Punkt-Biegeträgerversuches dargestellt. Wesentliche Grundparameter dafür sind:

- $E_{\text{Biegeträger}} = 12.000 \text{ N/mm}^2$,
- $b \times d \times h = 10 \times 10 \times 130 \text{ mm}^3$,
- $W_y = 166,6 \text{ mm}^3$,
- $L_{\text{Balken}} = 100 \text{ mm}$ (Abstand zwischen Endauflagern).

Die numerische Analyse der über die Trägerlänge aufgetragenen Längsspannung des Biegeträgers und der Vergleich mit ingenieurmäßig ermittelten Normalspannungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den voneinander unabhängigen Rechenmodellen. Nur in den Bereichen der Auflager treten lokale Effekte auf, die mit einfachen Ingenieurmodellen nicht hinreichend analysiert werden können.

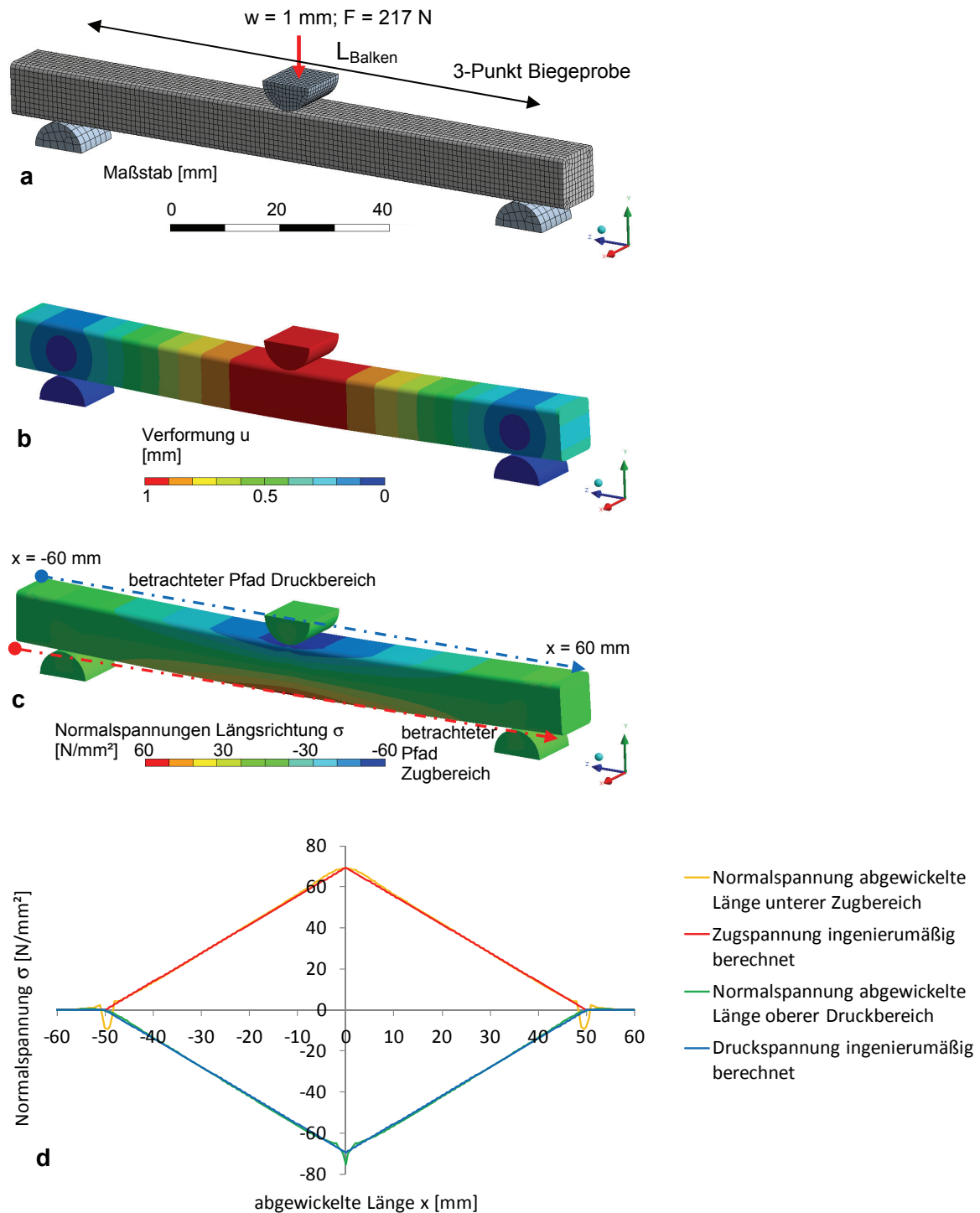


Abbildung 3.34: Ergebnisse der FEM-Analyse eines 3-Punkt-Biegeversuches; a: Belastungsmodell; b: Verformungen des Biegezugträgers [mm]; c: Normalspannungen in Balkenlängsachse [N/mm²]; d: Normalspannungen, aufgetragen über die Balkenlänge [N/mm²]; für Druck- und Zugbereich und Vergleich mit ingenieurmäßigen Spannungen

Der 3-Punkt-Biegeversuch ist damit sehr gut geeignet für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit der faserverstärkten Klebstoffe. Für die Bestimmung der Druckfestigkeit ist der Versuch weniger geeignet, da im Bereich der maximal auftretenden Druckspannung eine Überlagerung aus Normalspannung und lokal eingeleiteter Druckspannung eintritt.

3.2.3 Adhäsionsbetrachtungen

Ziel der Faserverstärkung ist die Verbesserung der Kohäsionseigenschaften des KfV. Die Adhäsionseigenschaften gegenüber anderen Substratoberflächen sollen dabei möglichst unbeeinflusst bleiben. Es werden Scherversuche durchgeführt, die einen Vergleich zwischen den Schubfestigkeiten des unverstärkten Klebstoffs und des KfV's bei gleicher Probengeometrie ermöglichen. Zu beachten ist dabei, dass die Schubspannung nur ingenieurmäßig ausgewertet werden kann und eine Änderung der Steifigkeit des Klebstoffs zu einer geänderten Schubspannungsverteilung in der Klebfuge führt. Numerische Untersuchungen, die diese Abhängigkeit belegen, sind in Abbildung 3.36 dargestellt.

Die Schubversuche werden an einheitlichen Versuchskörpern mit den Parametern:

- Quadratrohr QR 25 x 2,5 Aluminium EN AW-6005A T4 anodisiert,
- Füllung der Quadratrohre mit Klebstoff bzw. KfV,
- Füllhöhe $h_1 = 50$ mm und vergleichend $h_2 = 80$ mm,
- Klebfläche $U \times h_1 = 4.200$ mm² für 50 mm Höhe und $U \times h_2 = 6.720$ mm² für 80 mm,

durchgeführt. Damit kann der Einfluss der Übertragungslänge auf die Schubspannungsverteilung und die Höhe der Bruchkraft ermittelt werden. Die numerischen Untersuchungen decken sich mit den experimentell ermittelten Daten, wonach sich eine Verlängerung der Eintragstiefe der Klebverbindung degressiv nichtlinear auf die maximale Bruchkraft auswirkt.

Bei den Versuchsergebnissen wird eine Erhöhung der Bruchkraft infolge der Faserverstärkung festgestellt. Das Bruchbild ändert sich ebenfalls. Bei unverstärkten Klebstoffen wird eine Mischung aus Adhäsionsversagen und Kohäsionsversagen innerhalb des Klebstoffs festgestellt. Bei den faserverstärkten KfV ist hingegen ein reines Adhäsionsversagen zu beobachten, mit einer geringfügig höheren Bruchkraft. Der Versagenstyp wechselt von einem duktilen Versagen des unverstärkten Klebstoffs zu einem spröden Versagen des KfV's. Unterschiedliche Bruchbilder vom unverstärkten Klebstoff und dem KfV-A sind in Abbildung 3.35 dargestellt.

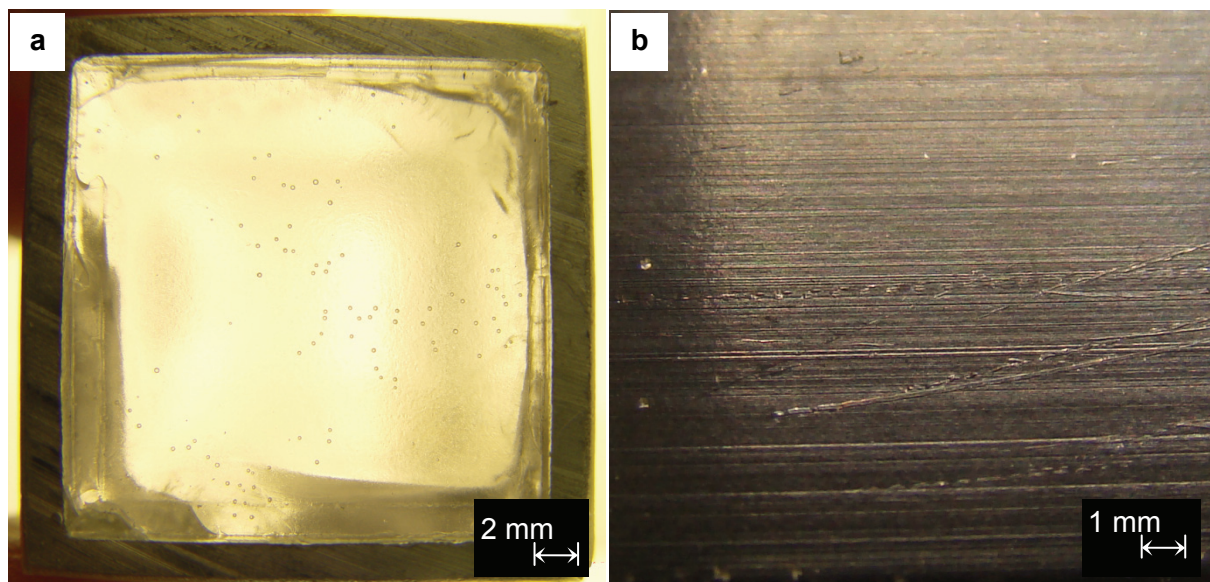


Abbildung 3.35: Bruchbild nach Abscherversuch; a: unversärkter 2-K Epoxidharzklebstoff von KfV-A; b: Oberfläche des KfV-A nach Abscherversuch

Die numerische Analyse der Abscherversuche ermöglicht eine gezielte Bewertung experimentell ermittelter Versuchsergebnisse hinsichtlich lokal auftretender Schubspannungen in

Abhängigkeit der Steifigkeit des KfV. Grundlage dafür bilden die aus dem einaxialen Zugversuch ermittelten Materialkennwerte. Ergebnisse der numerischen Betrachtung eines Abscherversuches sind in Abbildung 3.36 dargestellt. Wesentliche Ausgangsparameter dafür sind:

- Abscherversuch aus einem gefüllten Hohlprofil,
- Hohlprofil QR 25 x 2 mm; $E = 70.000 \text{ N/mm}^2$,
- Füllkörper $L = 50 \text{ mm}$; $E = 12.000 \dots 1.000 \text{ N/mm}^2$,
- Stempelkraft $F = 50 \text{ kN}$.

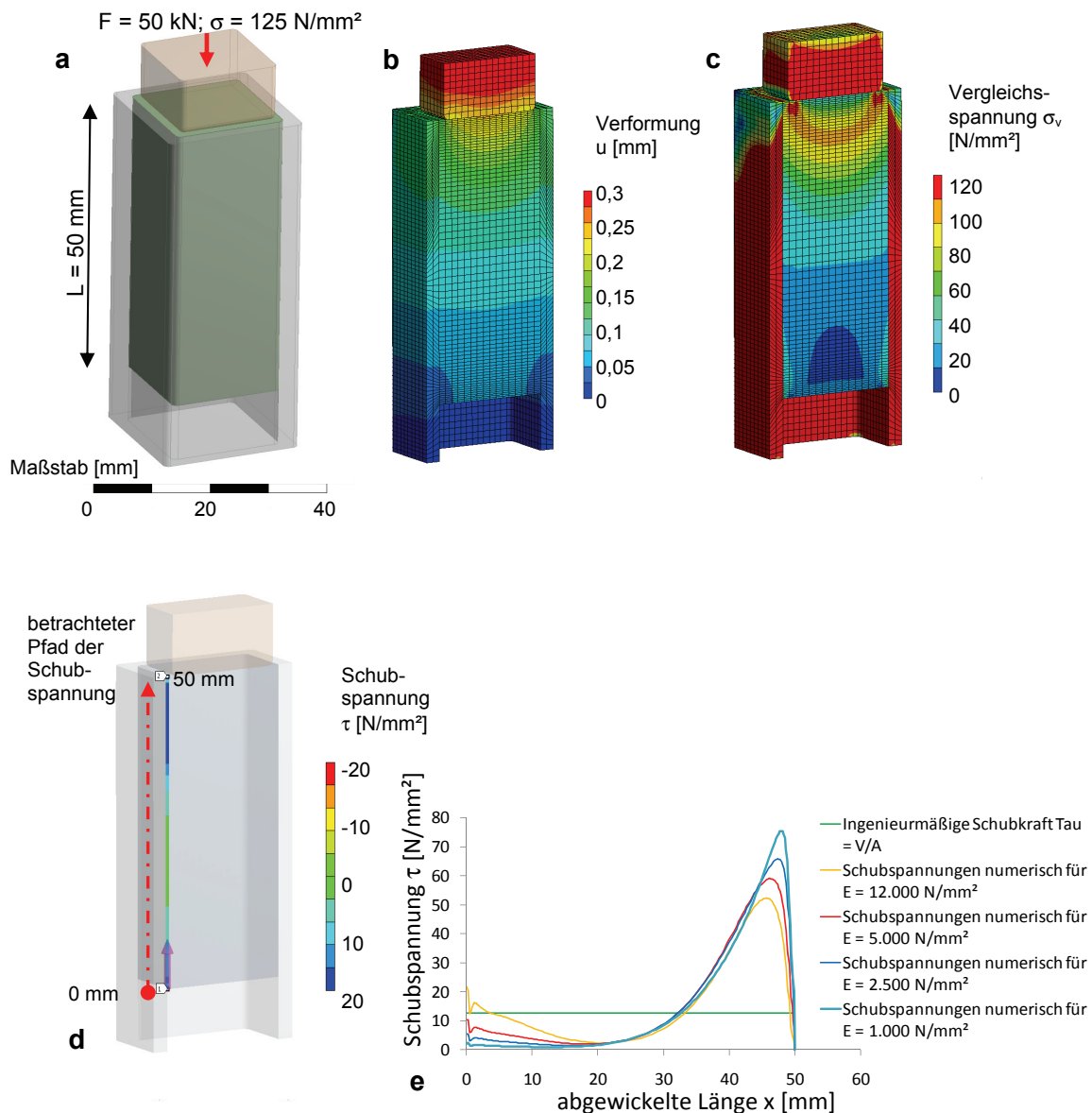


Abbildung 3.36: Ergebnisse der FEM-Analyse eines Abscherversuches; a: Belastungsmodell; b: Verformungen innerhalb des Versuchskörpers [mm]; c: Vergleichsspannungen innerhalb des Versuchskörpers [N/mm^2]; d: Schubspannungen in der Adhäsionsfuge Hohlprofil – KfV in Abhängigkeit der Steifigkeit des KfV

Im Ergebnis der numerischen Betrachtung wird die Abhängigkeit der maximal auftretenden Schubbeanspruchung in der Klebfuge von der Steifigkeit des Füllkörpers sichtbar. Ein geringer E-Modul führt dabei zu hohen lokalen Beanspruchungen im Füllkörper und der Adhäsionsfuge. Das korreliert auch mit den experimentellen Untersuchungen an Faser-

Matrix-Systemen, in denen bei niedrigmoduligen KfV geringere Abscherkräfte gemessen wurden als bei höhermoduligen KfV.

Für den KfV bedeutet dies, dass eine möglichst hohe Steifigkeit anzustreben ist, um die Schubbeanspruchungen gleichmäßiger zu verteilen und damit höhere Beanspruchbarkeiten zu erzielen. Die optimale Steifigkeit des KfV entspricht dabei der Steifigkeit des Substrates, im vorliegenden Fall also der Steifigkeit von Aluminium. Das kann mit Kunststoffen, die mit multiaxial stochastisch verteilten Faserwerkstoffen verstärkt werden, nicht erreicht werden. Dennoch wirkt sich ein möglichst geringer Unterschied der Steifigkeiten von KfV und Substratoberfläche abmindernd auf die Adhäsionsbeanspruchung aus.

Adhäsionsverbessernde Maßnahmen

Eine grundlegende Frage bei der Entwicklung von Faserverbundwerkstoffen mit Kurzschnittfasern betrifft die Problematik des optimalen Verbundes zwischen Fasern und Matrix. Numerische Untersuchungen zur Einbindung einzelner Fasern in einem Faser-Matrix-System, die in Abschnitt 3.1.4 vorgestellt werden, zeigen, dass die Schubspannung in der Adhäsionsschicht zwischen Faser und Matrix eine starke Konzentration an den Faserenden aufweist. Das Versagen eines Faser-Matrix-Systems ist hier meist geprägt durch ein Adhäsionsversagen zwischen Faser und Matrix, was zu einem Herausziehen der Fasern aus der Matrix führt. Daraufhin erfolgt ein Bruch der Matrix, da der statisch wirksame Faseranteil sich stark reduziert. Untersuchungen an den Bruchflächen von KfV-A bestätigen dies.

Eine typische Bruchfläche infolge einer Zugbeanspruchung von KfV-A ist in Abbildung 3.37 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der Bruch des Faser-Matrix-Systems durch ein Adhäsionsversagen zwischen Faser und Matrix verursacht wurde. Dieses Bruchverhalten wird auch als Zwischenfaserbruch bezeichnet. Die Steigerung der Adhäsionsfestigkeit oder eine Reduzierung der Schubspannungen zwischen Fasern und Matrix wirkt sich damit auf das Faser-Matrix-System insgesamt festigkeitssteigernd aus.

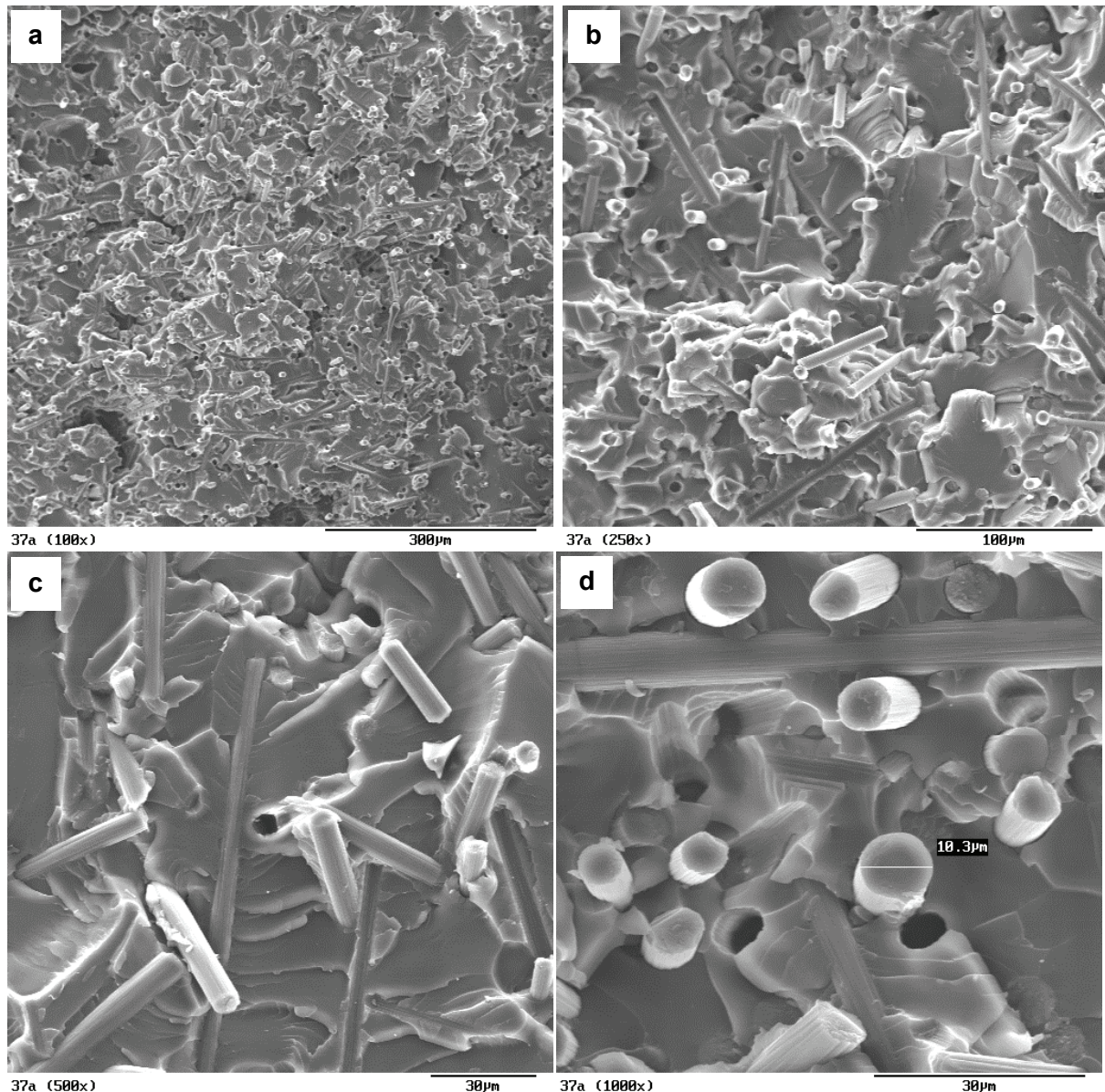


Abbildung 3.37: Bruchflächen des KfV-A mit Kohlenstofffasern ohne Schlichte nach Zugbeanspruchung; Adhäsionsbruch; a: 100-fache Vergrößerung; b: 250-fache Vergrößerung; c: 500-fache Vergrößerung; d: 1000-fache Vergrößerung

Eine wirkungsvolle Möglichkeit zur Verbesserung der Adhäsion zwischen Faser und Matrix besteht in der Beschichtung der Fasern mit einer speziell auf den Klebstoff abgestimmten Schlichte, die quasi als Haftvermittler oder Primer dient. Speziell für Kohlenstoffkurzschnitfasern stehen verschiedenartige Schlichten zur Verfügung. Es werden wasserlösliche, Polyurethan- und Silanschichten angeboten, die auf das jeweils verwendete Klebstoffsystem zugeschnitten sind. Experimentelle Untersuchungen an Faser-Matrix-Systemen mit silanbeschichteten Kohlenstofffasern zeigen höhere Steifigkeiten und Festigkeiten verglichen mit ähnlichen Faser-Matrix-Systemen, bei denen die Fasern nicht mit einer Schlichte versehen sind. Das Bruchbild ändert sich dann dahingehend, dass die Fasern zum Teil bis zur Festigkeitsgrenze beansprucht werden, was an kohäsiv gebrochenen Fasern zu erkennen ist. Abbildung 3.38 zeigt das Bruchbild eines Faser-Matrix-Systems, bei dem silanbeschichtete Kohlenstofffasern verwendet wurden.

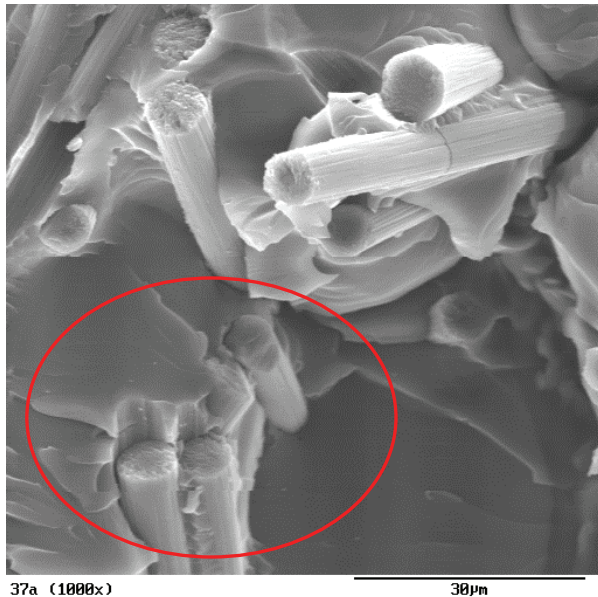


Abbildung 3.38: Bruchfläche von KfV-A mit silanbeschichteten Kohlenstofffasern nach Zugbeanspruchung; Kohäsionsbruch in Fasern und Matrix

Der Bruch wird durch ein Versagen der Kohlenstofffasern initiiert. In der Folge nehmen Steifigkeit und Festigkeit des Faser-Matrix-Systems schlagartig ab. Das führt zu einem Bruch der Klebstoffmatrix, das Faser-Matrix-System versagt schlagartig. Das spröde Versagensbild ist somit bei allen KfV zu beobachten, die einen hohen Traglastanteil durch die Fasern übertragen, unabhängig von der Adhäsionskraft innerhalb des Faser-Matrix-Systems.

3.2.4 Temperaturdehnungen

Der Einfluss unterschiedlicher Temperaturdehnungen wird für die untersuchten KfV-Varianten mittels zyklischer Klimatests analysiert. Der für Schädigungen besonders kritische Bereich liegt in der Adhäsionsfuge zwischen Fasern und Klebstoff. Numerische Untersuchungen der Auswirkung von Temperaturänderung auf die Mikrostruktur des KfV zeigen, dass die infolge von Temperaturdehnungsunterschiede entstehenden Beanspruchungen in ihrer Beanspruchungsintensität sich nicht grundlegend von Beanspruchungen unterscheiden, die durch äußere Lasten erzeugt werden. Temperaturdehnungsunterschiede sollten daher grundlegend bei der Entwicklung eines KfV mit berücksichtigt werden. Beispielhafte numerische Untersuchungen zu dieser Problematik werden in dem vorherigen Abschnitt 3.1.4 gezeigt.

Der experimentell zu untersuchende Bereich ist jedoch so klein, dass die Schädigung infolge Temperaturdehnung nur in einem übergeordneten Versuch experimentell ermittelt werden kann. Dazu werden Zugstäbe aus KfV nach DIN EN ISO 527-4 hergestellt (Deutsches Institut für Normung, 1997) und klimatisch mit Temperaturwechseln belastet. Wesentliche Versuchsparameter sind:

- 300 Temperaturwechsel $v_u = -20\text{ °C}$ / $v_o = +100\text{ °C}$; Umlaufdauer $T = 6\text{ h}$,
- bei einer konstanten Luftfeuchtigkeit $\rho = 60\text{ %}$.

Die vergleichende Betrachtung der Zugfestigkeiten vor und nach der Klimabelastung lässt Rückschlüsse auf Schädigungen in der Adhäsionsschicht zwischen Klebstoff und Fasern zu. Die Temperaturwechselbeanspruchung wird an den beiden schwerpunktmäßig untersuchten KfV-Varianten KfV-A und KfV-B durchgeführt. Im Ergebnis der Klimawechselbeanspru-

chung wird die Zugfestigkeit der KfV-Varianten relativ zu ihren Ausgangsfestigkeiten bestimmt.

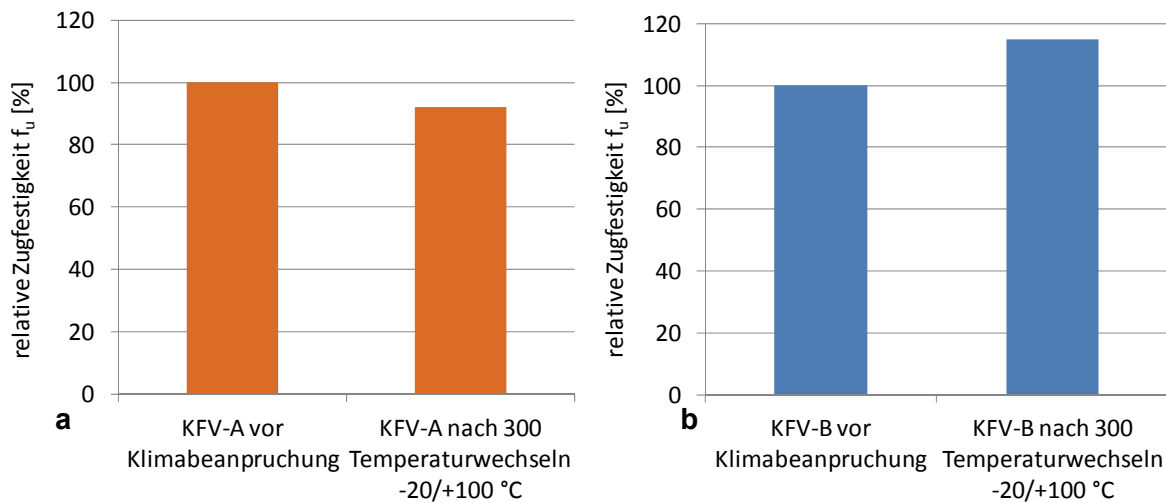


Abbildung 3.39: Auswirkung der Klimabeanspruchung bezogen auf die Ausgangszugfestigkeiten; a: KfV-A; b: KfV-B

Im Ergebnis der Untersuchungen sind für die beiden KfV-Varianten unterschiedliche Auswirkungen infolge der Temperaturdehnungen zu beobachten. Der mit einem hohen Kohlenstofffaser-Volumenanteil verstärkte KfV-A reagiert auf die Temperaturwechselbeanspruchung mit einem leichten Abfall der Zugfestigkeit. Die Ursache hierfür ist der hohe Faservolumenanteil in Kombination mit einer geringeren Steifigkeit der Klebstoffmatrix von KfV-A. Damit entstehen hohe Beanspruchungen in den Faserendbereichen, die zu einer definierten Vorschädigung des KfV durch die klimatische Beanspruchung führen. Die Variante KfV-B reagiert auf die Temperaturwechselbeanspruchung mit einer Zunahme der Zugfestigkeit. Das wird durch Nachhärten des Klebstoffs infolge Temperatureinwirkung verursacht. Der geringere Steifigkeitsunterschied zwischen Fasern und Matrix führt zu geringeren Schubbeanspruchungen in den Endbereichen der Faser-Matrix Verbindung.

3.2.5 Aushärtvorgang

Einfluss der Faserverstärkung auf den Aushärtvorgang

Bei der Aushärtung von KfV ist zu beachten, dass sich Topfzeit und Aushärtedauer im Vergleich zu den unverstärkten Klebstoffsystemen verlängern. Das ist darauf zurückzuführen, dass die im Klebstoff enthaltenen Monomere nach dem Vermischen mit den Faserwerkstoffen keine homogene Klebstoffmatrix ausbilden können. Die in der Klebstoffmatrix eingeschlossenen Fasern bzw. Füllstoffe stellen für die gemischten Klebstoffmonomere Störstellen dar, die eine chemische Reaktion der Monomere zum Polymer erschweren. Während der Entwicklung unterschiedlicher KfV-Varianten wurde ein Zusammenhang zwischen Fasergehalt und Aushärtedauer festgestellt. Die Aushärtedauer des KfV steigt dabei ab einem bestimmten Fasergehalt überproportional an. Bei der nachfolgenden mechanischen Untersuchung dieser KfV-Proben wurden zudem geringere Festigkeitseigenschaften nachgewiesen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Vernetzung des Klebstoffs so stark behindert wird, dass im ausgehärteten Zustand eine durchgehende Vernetzung des Klebstoffpolymers, die alle Fasern umschließt, nicht erreicht werden kann.

Minimierung der Aushärtedauer

Bei der industriellen Anwendung von KfV spielt die Taktzeit eine wesentliche Rolle in Bezug auf die Produktivität und Wirtschaftlichkeit eines Fügeverfahrens. Es wurden verschiedene Varianten zur Minimierung der Aushärtedauer untersucht. Die Aushärtedauer eines Klebstoffs ist bestimmt durch seine chemische Zusammensetzung und verschiedene Randbedingungen. Eine Gemeinsamkeit vieler Klebstoffe besteht in der Temperaturabhängigkeit der Aushärtzeit. Bei hohen Temperaturen erfolgt die Aushärtung wesentlich schneller als bei niedrigen Temperaturen (siehe Anhang, Abschnitt A.4 Aushärtung von Klebstoffen).

Für die Verarbeitung der KfV bedeutet dies, dass die Temperatur während des Mischvorgangs der Klebstoffmonomere mit den Fasern möglichst niedrig sein soll, damit die Topfzeit, in der der KfV verarbeitet werden kann, nicht stark verkürzt wird. Nach vollendeter Applikation des KfV besteht die Möglichkeit, durch eine begrenzte Temperaturerhöhung den Aushärtvorgang zu beschleunigen.

Die Anwendung der Induktionserwärmung stellt eine interessante Variante zur Verkürzung der Aushärtedauer dar. Voraussetzung für die Anwendung eines solchen Verfahrens ist, dass der zu erwärmende Körper elektrisch leitfähig ist. Die induktive Erwärmung erfolgt dann durch ein magnetisches Wechselfeld, das in elektrisch leitfähigen Materialien abgebremst wird. Diese sogenannten Wirbelstromverluste führen zur Erwärmung des Werkstoffs. Bei der induktiven Aushärtung des KfV kann zwischen zwei grundsätzlichen Varianten unterschieden werden:

- der aktiven Induktionserwärmung,
 - der KfV enthält elektrisch leitfähige Bestandteile und wird direkt erwärmt,
 - ein niederfrequentes Induktionsfeld mit größerer Abstrahltiefe zur Durchstrahlung des KfV ist erforderlich,
- und der passiven Induktionserwärmung,
 - der KfV enthält keine elektrisch leitfähigen Bestandteile und wird indirekt über die elektrisch leitfähige Substratoberfläche erwärmt,
 - ein hochfrequentes Induktionsfeld mit geringerer Abstrahltiefe ist für die Erwärmung des Substrats erforderlich.

Die aktive Induktionserwärmung eignet sich besonders für KfV mit Metallfasern oder einer Metallfüllung. Die Metaldichte sollte dabei möglichst hoch sein und eine homogene Verteilung im KfV aufweisen.

Die passive Induktionserwärmung ist für alle nichtleitenden KfV geeignet. Das Verfahren ist somit relativ universell einsetzbar und erfordert lediglich ein elektrisch leitfähiges Substrat. In einem konkreten Anwendungsfall wird die passive induktive Erwärmung von KfV in einem Aluminiumhohlprofil untersucht.

Wesentliche Versuchsparameter sind:

- Aluminiumhohlprofil QR 25 x 2; L = 100 mm,
- einseitige Erwärmung an der Profilunterseite,
- Induktionsleistung $P_I = 100 \text{ W}$, $f_I = 800 \text{ kHz}$,
- Versuch ohne und mit KfV-Füllung des Quadratrohres,
- Thermoelemente an den vier Seitenflächen des Quadratrohres und im KfV.

Abbildung 3.40 zeigt die Durchführung der Induktionsversuche.

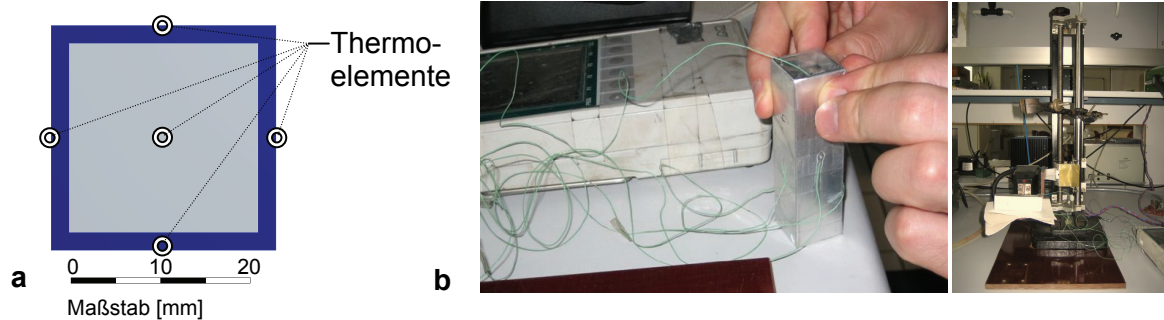


Abbildung 3.40: Induktive Erwärmung eines KfV im Aluminiumhohlprofil QR25 x 2; a: betrachteter Querschnitt; b: Applikation der Thermoelemente und Versuchsdurchführung

Die induktive Erwärmung führt zu einem Temperaturanstieg an einer Seite des Aluminiumprofils. Die Wärmeenergie wird über Wärmeleitung durch das Aluminium transportiert und relativ gleichmäßig in den KfV eingetragen. Voraussetzung dafür ist, dass für die Wärmeleitfähigkeit von Substrat und KfV folgende Bedingung eingehalten wird:

$$\lambda_{\text{Substrat}} \geq \lambda_{\text{KfV}}$$

Die Auswertung der durch Induktionserwärmung erzeugten Temperaturverläufe im Aluminium und im KfV ist in Abbildung 3.41 dargestellt.

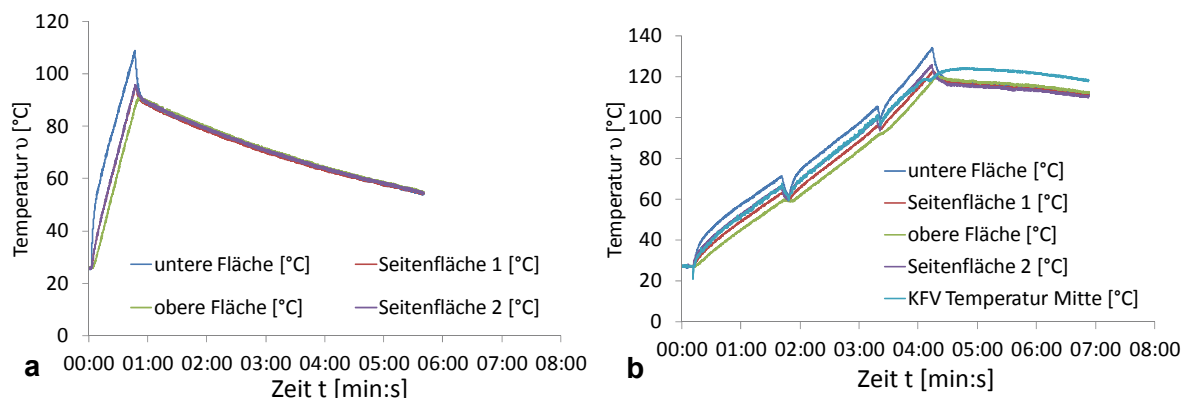


Abbildung 3.41: Temperaturentwicklung infolge induktiver Erwärmung; a: Aluminiumhohlprofil QR 25 x 2 ohne KfV; b: Aluminiumhohlprofil QR 25 x 2 mit KfV-B

Die passive induktive Erwärmung des Klebstoffs stellt insbesondere bei Aluminiumsubstratoberflächen eine zielführende Maßnahme dar, die es ermöglicht, den KfV lokal zu erwärmen und damit die Aushärtedauer zu verkürzen. Während der Experimente konnte eine drastische Verkürzung der Aushärtedauer auf ca. 10 % der bei Raumtemperatur benötigten Zeit beobachtet werden. Die durch Induktion eingebrachte Energie muss für jeden Anwendungsfall genau justiert werden, um einen optimalen, schrumpfarmen Aushärtvorgang zu ermöglichen.

3.3 Herstellungsaspekte und Anwendung

Die Parameter der Herstellung üben einen wesentlichen Einfluss auf die Anwendbarkeit eines KfV bei spezifischen Randbedingungen aus. In den folgenden Abschnitten 3.3.1 bis 3.3.3 werden grundlegende Herstellungsaspekte für die beiden ausgewählten KfV-A und KfV-B diskutiert.

3.3.1 Grundlagen

In den vorliegenden Untersuchungen werden die faserverstärkten Klebstoffe manuell hergestellt. Der Herstellvorgang gliederte sich in drei Gruppen:

- dem Mischen und Homogenisieren des 2K-Epoxidharzklebstoffes,
- der Zugabe des Faserwerkstoffs und
- dem Homogenisieren des KfV.

Bei dieser Prozesskette ist zu beachten, dass die für den Klebstoff herstellerseitig angegebene Topfzeit von dem Zeitpunkt an gerechnet werden muss, bei dem die Klebstoffmonomere Harz und Härter in Berührung kommen.

Die Herstellung des KfV-A ist technologisch unkompliziert einzuordnen. Die lange Topfzeit des Klebstoffs ermöglicht relativ lange Verarbeitungszeiten. Die niedrige Viskosität des Klebstoffs vereinfacht das Einmischen und Homogenisieren der Fasern im KfV. Von der geringen Viskosität profitiert ebenfalls die Applikationstechnik, der KfV kann durch sehr kleine Applikationsschläuche und -düsen transportiert werden. Weiterhin ist die Anwendung des KfV in kleinen und komplizierten Geometriebereichen möglich. Der wesentliche Nachteil des KfV-A besteht in der nach dem Applizieren benötigten Aushärtedauer, die zum Erreichen einer Standfestigkeit notwendig ist.

Die Herstellung des faserverstärkten und zusätzlich mit Quarzsand gefüllten KfV-B ist als technologisch anspruchsvoll einzuordnen. In der untersuchten Herstellungsabfolge wird die Quarzsandfüllung in die Klebstoffmonomere vor deren Vermischen eingebracht. Das ermöglicht eine Verlängerung der Verarbeitungszeit, da, ausgehend von der Topfzeit, dann nur die für KfV-A beschriebenen Verarbeitungsschritte anfallen.

Abbildung 3.42 zeigt die manuelle Herstellung des KfV-B sowie eine mögliche Anwendung als Spritzwerkstoff.

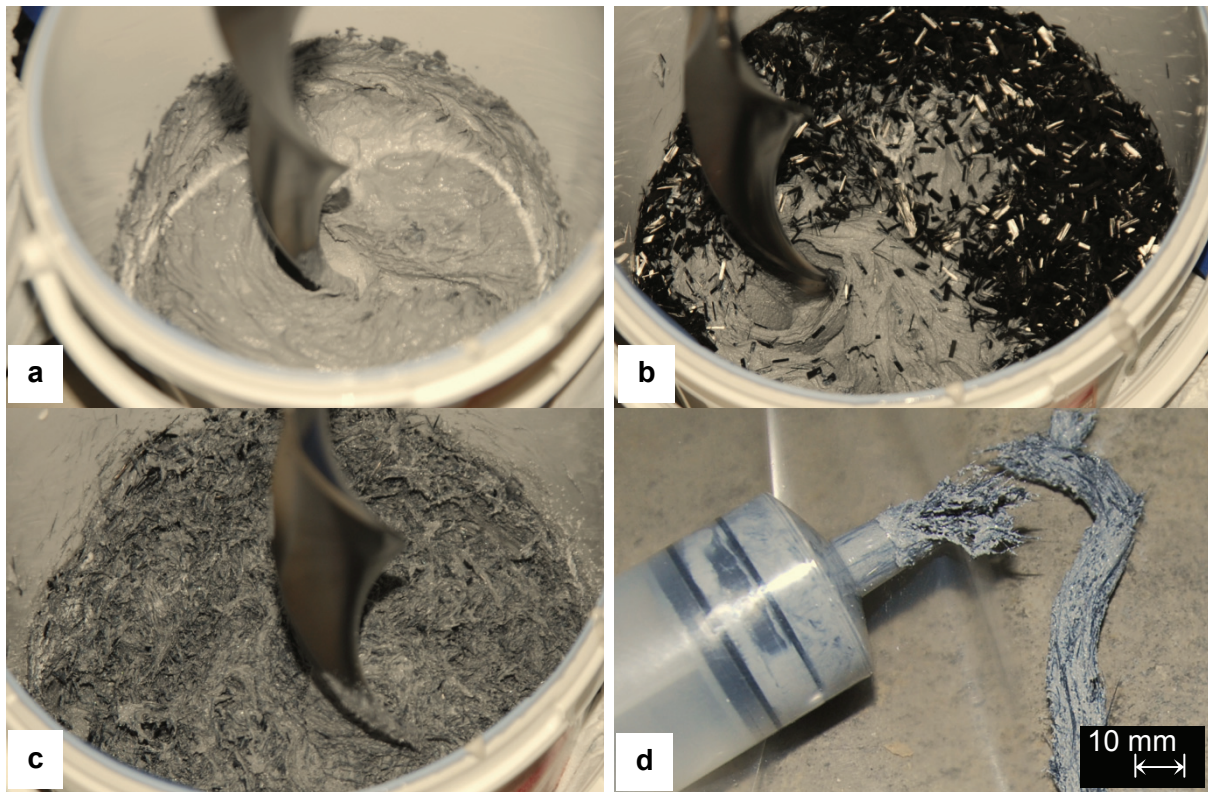


Abbildung 3.42: Herstellung und Verarbeitung von KfV-B; a: Homogenisieren von Harz und Härter; b: Einbringen der Fasern; c: Homogenisieren des Faser-Klebstoff-Gemischs; d: Ausbringen des spritzfähigen KfV

Bei der Herstellung und Verarbeitung von KfV-B ist es erforderlich, den Mischvorgang zwischen Fasern und SiO_2 -gefüllter Klebstoffmatrix als letzten Schritt in die Prozesskette zu integrieren. Eine Herstellungskonfiguration, bei der die Fasern analog zum Füllstoff in den Klebstoffmonomeren eingebracht werden, führt zu Problemen bei der Homogenisierung der Klebstoffkomponenten. Eine durchgängige gleichbleibende Qualität der Aushärtung kann dann nicht gewährleistet werden. Aufgrund der hohen Viskosität des verarbeitungsfertigen KfV-B führen Abrasionsvorgänge langfristig zu einer Schädigung im Mischkopf. Hier sind noch Technologien zu erarbeiten, die Schädigungen zu reduzieren oder in ihren Auswirkungen zu begrenzen. Die verarbeitungstechnisch kritisch zu betrachtende hohe Viskosität des KfV-B stellt nach der Applikation einen wesentlichen Vorteil in der Anwendung dar. Der KfV weist nach dem Applizieren eine ausreichend hohe Standfestigkeit auf, so dass er sogar in Überkopfpositionen eine Form behält. Damit können die Verarbeitungsvorgänge vereinfacht und zusätzlich sehr kurze Taktzeiten realisiert werden.

3.3.2 Entwicklung einer Applikationseinheit

In einem aktuellen Forschungsprojekt (Werner, et al., 2011) werden Möglichkeiten der Applikation unterschiedlicher KfV untersucht. Ein wesentlicher Punkt in der Prozesskette stellt dabei die Einbringung der Fasern in den Klebstoff dar. Nachdem die Fasern in den Klebstoff eingebracht sind, steigt die Viskosität des entstandenen Gemisches sprunghaft an. Daraus resultiert eine starke Abrasionseigenschaft, die schädigend auf die Dosier- und Applikationseinheit einwirkt. Gängige Misch- und Förderelemente, die beispielsweise für Spritzgussanlagen verwendet werden, sind in Abbildung 3.43 dargestellt.

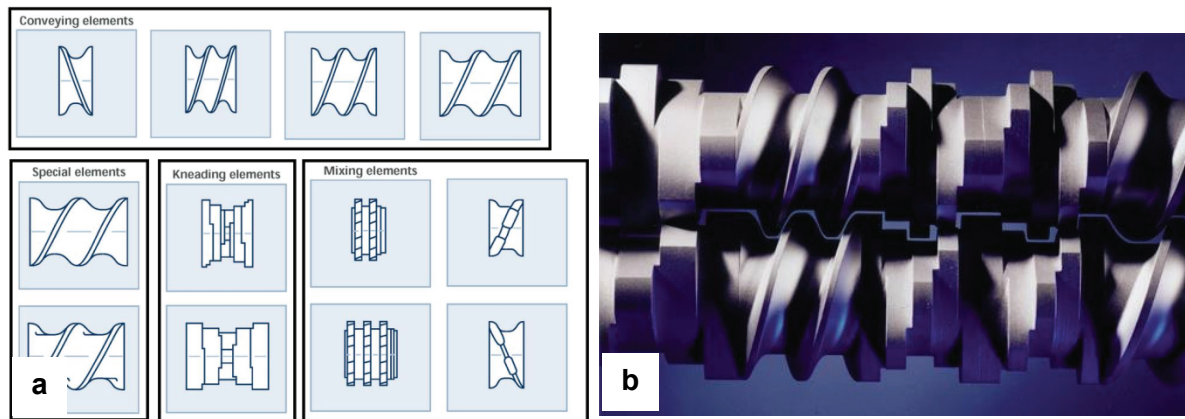


Abbildung 3.43: Misch- und Fördereinrichtung für hochviskose Kunststoffmonomere (Golz, et al., 2011); a: einzelne Misch- und Förderelemente; b: kombinierte Misch- und Fördereinheit

Die Zuführung des homogenisierten 2K-Epoxidharzklebstoffes erfolgt in einem kontinuierlichen Prozess, bei dem die Klebstoffmonomere mit Zahnradpumpen in einen ersten Mischkopf gefördert werden. Anschließend erfolgt ein Weitertransport in einen zweiten Mischkopf, in dem die Fasern eingemischt werden. Der homogenisierte KfV-Werkstoff wird anschließend in eine Applikationseinheit gefördert und steht damit für eine Anwendung zur Verfügung. Das schematische System für eine Misch- und Applikationseinrichtung ist in Abbildung 3.44 dargestellt.

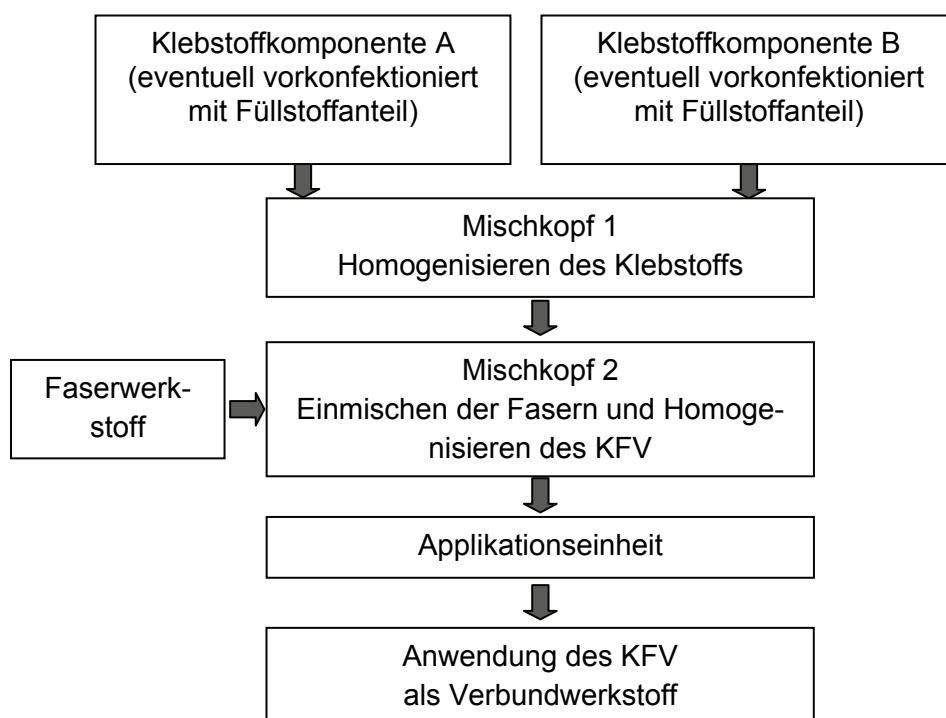


Abbildung 3.44: Schematischer Ablauf für die Herstellung und Applikation eines KfV

Diese Misch- und Applikationseinheit befindet sich derzeit in Entwicklung. Um wirtschaftliche Anwendungen des KfV zu ermöglichen, sollen bei dieser Anlage alle Teile, die planmäßig mit den gemischten Klebstoffkomponenten Harz und Härter in Kontakt geraten, aus preiswerten Einwegwerkzeugen bestehen. Damit kann der manuelle Reinigungsaufwand, der an der Anlage entsteht, auf ein notwendiges Minimum reduziert werden.

3.3.3 Parameter der Anwendung

Für die untersuchten KfV-Werkstoffe sind vielfältige Anwendungsmöglichkeiten denkbar. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei spezielle Anwendungsfälle untersucht. Das betrifft eine Anwendung im Fassadenbau, wo Aluminiumhohlprofile mittels KfV verbunden werden. Eine andere Anwendung betrifft die Verstärkung bzw. Revitalisierung von Beton, bei der der KfV als Zugbewehrung flächig auf die Betonoberfläche aufgetragen wird.

KfV im Fassadenbau

Bei der Herstellung von Fassadenelementen aus Aluminiumhohlprofilen werden gegenwärtig komplizierte, manuell zu erstellende Verbindungen angewandt. Diese Verbindungstechniken sind begrenzt hinsichtlich einer Automatisierbarkeit des Produktionsprozesses und erfordern zudem eine Vielzahl unterschiedlicher Werkzeuge und Verbindungsmittel. Die Substitution dieser herkömmlichen Verbindung durch eine Verbindungsvariante mit KfV bietet wesentliche Vorteile, da ein Großteil der heutzutage notwendigen Verbindungsmittel und Werkzeuge nicht mehr benötigt werden. Umfangreiche Untersuchungsergebnisse und Vergleiche unterschiedlicher Verbindungstypen werden im Anhang in Abschnitt A.7 vorgestellt.

KfV als Zugbewehrung von Beton

Die nachträgliche Revitalisierung von Betonelementen zur Steigerung der Biegetragfähigkeit erfordert i. Allg. relativ aufwändige Verfahren, bei denen zusätzliche Bewehrung entweder eingeschlitzt oder an der Oberfläche angeordnet und mit Beton überdeckt wird. Das erfordert teilweise die Anordnung einer zusätzlichen Schalung. Ein anderer Ansatz geht dazu über, CFK-Lamellen oder Matten auf die Betonoberfläche aufzukleben und somit die Zugzone des Betonelementes zu verstärken. Die Verstärkung der Betonzugzone mit KfV stellt eine zur Kohlenstofffasermattenbewehrung mechanisch ähnlich wirkende Variante dar. Die KfV-Verstärkung von Betonelementen in der Betonzugzone wird in einem speziellen Anwendungsfall mit dem KfV-B experimentell und numerisch untersucht. Eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse ist im Anhang in Abschnitt A.8 dargestellt.

3.4 Bemessungskonzept

Der bautechnische Einsatz von KfV setzt für jedes Tragsystem eine spezifische Beurteilung des Gefahrenpotenzials und möglicher Schadensfolgen voraus. So zeigen die Bemessungsansätze von Fassadenverbindungen andere systemrelevante Parameter auf, als Verstärkungen statisch relevanter Bauteile. In den folgenden Abschnitten 3.4.1 und 3.4.2 werden Bemessungsansätze für den bautechnischen Einsatz von KfV dargestellt. Grundlegende Kriterien und Regelungen, die bei der generellen Entwicklung eines Bemessungskonzeptes zu beachten sind, werden im Anhang in Abschnitt A.2 erläutert.

3.4.1 Sicherheitsbetrachtungen

Wesentliche Parameter, die in Sicherheitsbetrachtungen bewertet werden müssen, betreffen das Eintreten eines Versagenszustandes und die Folgen, die sich daraus ergeben. Wie im Anhang in Abschnitt A.2.1 beschrieben, kann eine Einteilung in Sicherheitsklassen nach den Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen (Deutsches Institut für Normung, 1981) erfolgen, um zulässige Versagenswahrscheinlichkeiten in den Grenzzuständen von Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit festzulegen. Die Grundlage dafür liegt in einer Bewertung des Tragsystems hinsichtlich der Redundanz bei lokalem Systemversagen.

Fassadenelemente, die in den Stößen mittels KfV gefügt werden, weisen ein redundant wirkendes Tragverhalten auf. Experimentelle Untersuchungen, die im Anhang in Abschnitt A.7.4 dargestellt sind, zeigen, dass nach dem Versagen einer KfV-Verbindung eine Lastumlagerung auf benachbarte Verbindungen erfolgt. Die Steifigkeit des Fassadenelementes nimmt dabei schlagartig ab. Dieser Effekt führt zu einer sehr gleichmäßigen Verteilung der Beanspruchung auf die funktionsfähigen Verbindungen. Ein Herabfallen von Fassadenelementen kann weitgehend ausgeschlossen werden. Der Schaden ist nach dem Eintreten sofort sichtbar. Er kann damit erkannt und behoben werden und bleibt somit auf einen lokalen Bereich begrenzt. Damit ist eine Einordnung in Sicherheitsklasse 1 nach (Deutsches Institut für Normung, 1981) gegeben, woraus sich zulässige Versagenswahrscheinlichkeiten von $p_f = 10^{-5}$ im Grenzzustand der Tragfähigkeit und $p_f = 5 \times 10^{-3}$ im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ergeben.

Tragelemente aus Beton, die mittels KfV im Bereich der Zugzone verstärkt werden, müssen hinsichtlich der auftretenden Beanspruchung im statischen System und deren Anwendungsbereich charakterisiert werden. Bei einer Anwendung dieser KfV-verstärkten Betonelemente als Einfeldträger in statisch sicherheitsrelevanter Position ergeben sich wesentlich höhere Sicherheitsanforderungen als bei einer Anwendung in statisch untergeordneten Positionen und redundant abgesicherten Bereichen. Damit ist eine Einordnung in alle drei Sicherheitsklassen möglich, woraus sehr unterschiedliche Anforderungen an die einzuhaltende Versagenswahrscheinlichkeit entstehen.

3.4.2 Bemessung

Rein deterministische Bemessungsansätze führen infolge des spröde versagenden KfV zu sehr hohen globalen Sicherheitsbeiwerten, was eine wirtschaftliche Anwendung erschwert. Daher sind probabilistische Bemessungsansätze zu bevorzugen (Deutsches Institut für Normung, 1981; Deutsches Institut für Normung, 2006; Küchler, 2009; Deutsches Institut für Normung, 2010). Ein für die probabilistische Bemessung sehr gut geeignetes Werkzeug stellt die versuchsgestützte Bemessung dar.

Bei Fassadenelementen, die in Deutschland eingesetzt werden sollen, besteht die Auflage einer CE-Kennzeichnung und einer damit einhergehenden Prüfung nach (Deutsches Institut für Normung, 2010) in einem dafür zertifizierten Institut. Hier werden Prüfungen auf Dichtheit und mechanische Beanspruchbarkeit der Fassadenelemente durchgeführt. Dieses Vorgehen ist bei den betrachteten Fassadenelementen zulässig, da nach der Sicherheitsbetrachtung ein Versagenszustand im Fassadenelement nur lokale Auswirkungen hervorruft, die nicht in globale Sicherheitsbetrachtungen für ganze Bauwerke mit einbezogen werden müssen.

Für Tragelemente aus Beton, die in der Zugzone mit KfV verstärkt werden, ist eine versuchsgestützte Bemessung des Bauteilwiderstands nach (Deutsches Institut für Normung, 2010) empfehlenswert. Es ist zulässig, Bauteileigenschaften entweder herausgelöst zu betrachten oder eine konkrete versuchsgestützte Bemessung am Gesamtbauteil durchzuführen. Die herausgelöste Bestimmung einzelner Eigenschaften ist dabei an die Bedingung gekoppelt, dass die im Gesamtmodell vorliegenden Randbedingungen keine negativen Auswirkungen auf das zu untersuchende Objekt haben. Bedingt durch die Kerbwirkung, die entstehende Risse im Beton auf den KfV ausüben, ist auf der sicheren Seite liegend, die direkte Bestimmung des Bemessungswertes für den Tragsicherheitsnachweis empfehlenswert. Der Bemessungswert X_d wird dann bestimmt mit (Deutsches Institut für Normung, 2010):

$$X_d = \frac{\eta_d}{Y_m} \times X_{0d} = \frac{\eta_d}{Y_m} \times \exp(m_y - k_{d,n} \times s_y). \quad (3.7)$$

mit: η_d Faktor für Unsicherheiten, die nicht durch Versuche abgedeckt sind
 m_y Mittelwert von Eigenschaften von n Proben
 $k_{d,n}$ Fraktilenfaktor für charakteristische Werte
 s_y Schätzwert für die Standardabweichung

4 Alu-CFK-Hybridelemente

Die Kombination von Aluminium und CFK ermöglicht eine Herstellung von sehr leichten lastabtragenden Hybridsystemen, die sehr günstige hybride Eigenschaften hinsichtlich der Tragfähigkeit und Montagefreundlichkeit aufweisen. Der leichte und zugleich hochtragfähige Werkstoff CFK ermöglicht als Verstärkung für im weitesten Sinne herkömmliche Aluminiumhohlprofile eine deutliche Erhöhung deren Steifigkeit und Tragfähigkeit. Die montagefreundlichen Fügeverfahren des Stahlbaus bleiben dabei erhalten.

4.1 Grundlagen

Die mechanische Wirkungsweise von Alu-CFK-Hybridelementen resultiert im Wesentlichen aus dem Zusammenwirken der unterschiedlichen Steifigkeiten und Festigkeiten von Aluminium und CFK. In den folgenden Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.5 werden die grundlegenden Zusammenhänge und Wechselwirkungen innerhalb von Aluminium-CFK-Hybridelementen dargestellt. Die Beurteilung mechanischer Effekte im Bereich der Klebverbindung Alu-CFK infolge Temperatureinwirkung stellt dabei einen Schwerpunkt dar.

4.1.1 Einleitung

Die Tragkonstruktionen von leichten Bauwerken für den temporären Gebrauch bestehen bisher i. Allg. aus Aluminiumhohlprofilen, da das Gewicht der Bauteile aus Anwendungsgründen möglichst gering sein soll. Bedingt ist dies durch den häufigen Auf- und Abbau, verbunden mit dem Transport der fliegenden Bauten.

Die Dimensionierung der Tragelemente, d.h. die Wahl von Werkstoffen, Querschnittsformen und -größen, wird bestimmt von der Anforderung, möglichst leichte Einzelbauteile zu erhalten. Die Profile weisen in der Regel einen geschlossenen Kastenquerschnitt auf und sind aufgrund der Möglichkeiten des Ziehens von Aluminium-Strang-Profilen sehr angepasst in ihren Querschnittsformen. Die Beanspruchung der Rahmenkonstruktionen erfolgt i. Allg. zu einem geringeren Teil aus dem Eigengewicht der Tragkonstruktion und zu einem wesentlichen Teil aus den zu erwartenden Windlasten. Infolge der statischen Belastung werden die Tragelemente vorwiegend einaxial biegebeansprucht belastet. Die Querschnitte sind i. Allg. doppelsymmetrisch gestaltet, um Torsionsbeanspruchungen zu vermeiden. Die prinzipielle Darstellung eines entsprechenden Hohlkastenprofilquerschnitts wird in Abbildung 4.1a gezeigt.

Eine Minimierung der Masse der Tragelemente bei gleichzeitiger Beibehaltung der Trageigenschaften, d. h. sowohl Steifigkeit als auch Tragfähigkeit, erscheint möglich, wenn Teile des Aluminiumquerschnittes durch Materialien ersetzt werden, die eine Kombination aus stark erhöhter Steifigkeit und Festigkeit, verglichen mit Aluminium, aufweisen. Die Verbindung von Aluminiumprofilen mit hochfesten CFK-Lamellen stellt eine praktische Möglichkeit für die Optimierung der betrachteten Tragelemente hinsichtlich:

- der Reduzierung der Masse und
- der Verkleinerung der Querschnittsabmessungen

dar. Die Anordnung der CFK-Lamellenverstärkung im Profilquerschnitt erfolgt in den mechanisch hochbeanspruchten Außenbereichen des Kastenquerschnitts. Diese mögliche Anordnung ist in Abbildung 4.1b dargestellt. Der strukturelle Verbund zwischen CFK-Lamelle und Aluminium wird mit einer Klebverbindung realisiert.

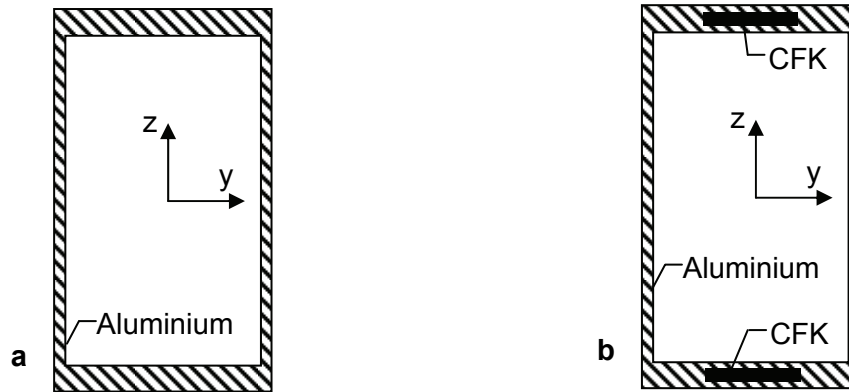


Abbildung 4.1: Prinzipieller Querschnitt geschlossener Kastenquerschnitte zur Abtragung vorwiegend einaxialer Biegebeanspruchungen M_y ; a: Aluminiumquerschnitt; b: Alu-CFK-Hybridquerschnitt

Die profilinterne Anordnung der CFK-Lamellen stellt mechanisch betrachtet eine optimale Lösung dar. Die daraus entstehenden Vorteile:

- dem Schutz der CFK-Lamelle vor äußeren Einwirkungen, Beschädigung, Wasser, UV und
- der Maximierung der Klebfläche zur Reduzierung der Klebfugenbeanspruchung

steht der verarbeitungstechnische Nachteil einer technisch komplizierten Herstellung durch den Einschub der CFK-Lamelle gegenüber.

Bei der Betrachtung der Gesamttragwirkung von Aluminium-CFK-Hybridkonstruktionen müssen die Materialeigenschaften der Ausgangswerkstoffe (Aluminium und CFK) analysiert werden. Die Kombination von Aluminium und CFK führt zu einem Hybridtragelement, das eine erhöhte Steifigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit aufweist. Die mechanischen Eigenschaften des Alu-CFK-Hybridelementes sind den Eigenschaften eines herkömmlichen Aluminiumquerschnitts somit in allen statisch relevanten Punkten überlegen. Grundlage hierfür sind folgende Eigenschaftskombinationen:

- $E_{CFK} > 2 \times E_{Aluminium}$,
 - \Rightarrow Die CFK-Lamelle nimmt bei elastischer Beanspruchung und gleicher Dehnung mehr als die doppelte Last auf als der Aluminiumwerkstoff.
- $f_{u,CFK} \geq R_{m,Aluminium}$,
 - \Rightarrow Die CFK-Lamelle hat eine höhere Festigkeit als Aluminium und kann Spannungen, die durch den E-Modul-Unterschied eingetragen werden, abtragen.
- $f_{u,CFK} > f_{y,Aluminium} \times \frac{E_{CFK}}{E_{Aluminium}}$,
 - \Rightarrow Die Tragfähigkeit vom Aluminium und der CFK-Lamelle werden zugleich abgerufen, es entsteht ein lastausgleichend wirkendes System.
- $\epsilon_{Bruch,Aluminium} > \epsilon_{Bruch,CFK}$,
 - \Rightarrow Die CFK-Lamelle kann im Gesamttragssystem ihre vollständige Tragfähigkeit einbringen.

Dieser Katalog der mechanischen Eigenschaften steht auch in einem engen Zusammenhang mit den für Faserverbundwerkstoffe geltenden Richtlinien, die in den auf Seite 23 aufgeführten Gleichungen beschrieben werden.

Daneben führen weitere Unterschiede zwischen den Werkstoffen Aluminium und CFK zu günstigen Hybridsystemeigenschaften.

$$\blacksquare \quad \varepsilon_{\text{elastisch, Aluminium}} < \frac{f_{u, \text{CFK}}}{E_{\text{CFK}}},$$

- \Rightarrow Das duktile Aluminium zeigt ein Versagen des Gesamtsystems an.

$$\blacksquare \quad \rho_{\text{CFK}} < \rho_{\text{Aluminium}},$$

- \Rightarrow Die Dichte von CFK entspricht etwa der Hälfte der Dichte von Aluminium.

Durch die flächige Klebverbindung zwischen Aluminium und der CFK-Lamelle können lokale, konzentrierte Lasteinleitungen im CFK vermieden werden und es wird eine werkstoffgerechte Konstruktion erreicht.

Die Ermittlung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Alu-CFK-Hybridelementen in der hier dargestellten Form ist mit einfachen mechanischen Modellen oder auf der Basis aktueller Normen ohne entsprechende experimentelle und numerische Überprüfungen nicht möglich. In rechnerischen und experimentellen Nachweisen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sind hybride Querschnitte aus der Verbindung von Aluminium-Profilen mit geschlossenem Querschnitt und CFK-Lamellen zu analysieren.

Der Lastfall Temperatur spielt eine Rolle bezüglich der Materialeigenschaften bei höheren Temperaturen und Temperaturwechselbeanspruchungen. Damit werden spezifische Anforderungen an das Tragverhalten definiert.

Für den praktischen Einsatz der Alu-CFK-Hybridträger werden entsprechend robuste Berechnungsmethoden für die Querschnittstragfähigkeit und die Systemverformung benötigt, die eine zuverlässige Bemessung der zu erstellenden Tragwerke ermöglichen.

Zielstellung ist die Darstellung einer Berechnungsmethode, die die Bemessung und den Tragfähigkeitsnachweis entsprechender Träger und deren Verbindungen mittels einfacher Handrechnung erlaubt, ohne dass bei Veränderung bestimmter Parameter der Querschnittsform neue experimentelle Untersuchungen notwendig sind.

Die Tragfähigkeitsgrenze der Hybridquerschnitte kann auf vier unterschiedliche Art und Weise erreicht bzw. definiert werden:

- dem Erreichen der plastischen Grenztragfähigkeit des Aluminiumwerkstoffes im Querschnitt in der am meisten beanspruchten Faser,
- dem Erreichen der Grenztragfähigkeit der CFK-Lamellen, die einen höheren Beanspruchungszustand (Längsspannungen) aufweisen als der Aluminiumwerkstoff,
- durch ein Schubversagen der Verklebung zwischen CFK-Lamelle und Aluminiumprofil,
- durch ein Schubversagen im Steg des Aluminiumquerschnitts.

Bei dem betrachteten System handelt es sich um eine Hybridkonstruktion, deren Gesamttragfähigkeit im Zusammenwirken aller einzelnen Komponenten erreicht wird. Eine Sicherheitsbewertung, wie sie heute teilweise noch üblich ist, die die einzelnen Komponenten betrachtet und für diese einzelne Sicherheitsfaktoren festlegt, ist weder ingenieurtechnisch noch ökonomisch sinnvoll.

Die Verklebung im Alu-CFK-Hybridprofil dient der Schubübertragung zwischen CFK-Lamelle und Aluminiumprofil. Die gegebene Konstruktionsform sieht eine Kammer vor, in der die Lamelle geführt und flächig über alle Oberflächenanteile mit dem Aluminiumprofil verbunden wird. Es stehen sehr große Klebflächen zur Verfügung, die i. Allg. nur an ganz spezifischen

Stellen, der Einleitung von Einzellasten oder lokalen Einleitung von Momenten, relevante Beanspruchungen erfahren.

4.1.2 Ingenieurmäßige Betrachtung

Bei der Betrachtung der Querschnittswerte und Tragfähigkeiten von Aluminium-CFK-Hybridelementen ist es erforderlich, grundlegend zwischen elastischen und plastischen Werkstoffeigenschaften zu unterscheiden. Bei der Werkstoffkombination aus Aluminium und CFK-Lamelle werden folgende Materialeigenschaften idealisiert angenommen:

- Aluminium:
 - Es gilt eine linear-elastische Spannungs-Dehnungs-Beziehung bei Belastungen bis zur Dehngrenze $R_{p0,2}$, darüber hinaus plastisch.
- CFK-Lamelle:
 - Es gilt eine linear-elastische Spannungs-Dehnungs-Beziehung bis zur Festigkeit $f_{u,CFK}$.

Die Kopplung der beiden Werkstoffe erfolgt unter Annahme des ebenen Querschnitts. Das setzt einen starren Verbund in der Klebfuge voraus, der in der Praxis aufgrund der geforderten elastischen Verbindung in momentbeanspruchten Trägerendbereichen nur annähernd gewährleistet ist. Numerische und experimentelle Untersuchungen zum starren Verbund haben gezeigt, dass zur vollständigen Aktivierung der CFK-Lamelle im Aluminium-CFK-Hybridelement eine Mindesteinbindetiefe der CFK-Lamelle im Aluminiumträger notwendig ist. Das bewirkt eine Begrenzung der Schubbeanspruchung in der Klebfuge und reduziert die Relativverschiebung zwischen Aluminium und CFK-Lamelle.

Auf Grundlage der vorliegenden Untersuchungen kann die Tragwirkung eines starren Verbundes bei einer Kombination von:

- erprobtem Klebstoff,
- definierter Klebschichtdicke,
- Begrenzung der Schubspannungen in der Klebfuge Aluminium – CFK

realisiert werden.

Für ingenieurmäßige Festigkeitsbetrachtungen kann dann die elastische Tragwirkung des Klebstoffs vernachlässigt werden. Für den Übergangsbereich zwischen Aluminium und CFK gilt dann:

$$\varepsilon_{CFK} = \varepsilon_{Aluminium} \quad (4.1)$$

Die Ermittlung der elastischen und plastischen Querschnittstragfähigkeit mit entsprechenden Nachweisen untergliedert sich in:

- der Ermittlung der elastischen Querschnittswerte $I_{y,eff}$ und $M_{el,y}$,
- der Ermittlung plastischer Querschnittswerte $M_{pl,y}$, N_{pl} und V_{pl} mit Interaktionsbedingungen,
- der Begrenzung der Schubspannung in der Klebfuge.

Die mechanische Besonderheit von Alu-CFK-Hybridelementen ist durch drei wesentliche physikalische Effekte geprägt:

- dem unterschiedlichen E-Modul und thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Aluminium und CFK-Lamelle und
- dem unterschiedlichen Grenztragverhalten der Ausgangswerkstoffe Aluminium und CFK.

Die ingenieurmäßige Beschreibung wesentlicher mechanischer Zusammenhänge kann mittels einfacher Gleichgewichts- und Verträglichkeitsbedingungen erfolgen. Für Beanspruchungen infolge unterschiedlicher Temperaturdehnungen gilt:

$$\sum N_{CFK} + \sum N_{Alu} = 0, \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_{Hybrid} = \varepsilon_{CFK, resultierend} = \varepsilon_{Alu, resultierend}, \quad (4.3)$$

$$F_{CFK} = E_{CFK} \times A_{CFK} (\varepsilon_{Hybrid} - \alpha_{T,CFK} \times \Delta T), \quad (4.4)$$

$$F_{Alu} = E_{Alu} \times A_{Alu} (\varepsilon_{Hybrid} - \alpha_{T,Alu} \times \Delta T), \quad (4.5)$$

mit: ε_{Hybrid} resultierende Dehnung im Hybridprofil.

Die resultierende Dehnung im Hybridprofil errechnet sich mit:

$$\varepsilon_{Hybrid} = \frac{A_{CFK} \times E_{CFK} \times \alpha_{T,CFK} \times \Delta T + A_{Alu} \times E_{Alu} \times \alpha_{T,Alu} \times \Delta T}{A_{CFK} \times E_{CFK} + A_{Alu} \times E_{Alu}}, \quad (4.6)$$

$$\sigma_{CFK} = E_{CFK} \times (\varepsilon_{Hybrid} - \alpha_{T,CFK} \times \Delta T), \quad (4.7)$$

$$\sigma_{Alu} = E_{Alu} \times (\varepsilon_{Hybrid} - \alpha_{T,Alu} \times \Delta T). \quad (4.8)$$

Damit kann die Beanspruchung im Hybridelement infolge Temperaturdehnungen für einen quasi stationären ungestörten Bereich ermittelt werden. Diese Betrachtung führt zu einer Begrenzung des CFK-Flächenanteils im Hybridquerschnitt, da Temperaturdehnungen keine plastischen Dehnungen im Aluminium auslösen sollten. Dies würde die Dauerhaftigkeit solcher Hybridelemente sehr stark einschränken.

Die Steifigkeit eines Alu-CFK-Hybridelementes kann berechnet werden mit:

$$(E \times A)_{Hybrid, effektiv} = E_{Alu} \times A_{Alu} + E_{CFK} \times A_{CFK}, \quad (4.9)$$

Bezogen auf die Steifigkeit des Aluminiums können dann effektive Querschnittswerte $A_{Hybrid, effektiv}$ und $I_{Hybrid, effektiv}$ für den Hybridquerschnitt definiert werden:

Längssteifigkeit:

$$A_{Hybrid, effektiv} = A_{Alu} + A_{CFK} \times \frac{E_{CFK}}{E_{Alu}}, \quad (4.10)$$

Biegesteifigkeit:

$$I_{Hybrid, effektiv} = I_{Alu} + I_{CFK} \times \frac{E_{CFK}}{E_{Alu}}. \quad (4.11)$$

Normalspannungen infolge Biegung und Normalkraft können dann für die verschiedenen Werkstoffe berechnet werden mit:

$$\sigma_{Alu} = \frac{N}{A_{Hybrid, effektiv}} + \frac{M}{I_{Hybrid, effektiv}} \times Z, \quad (4.12)$$

$$\sigma_{CFK} = \left(\frac{N}{A_{Hybrid,effektiv}} + \frac{M}{I_{Hybrid,effektiv}} z \right) \times \frac{E_{CFK}}{E_{Alu}} \quad (4.13)$$

Das Auftreten maßgebender Beanspruchungen in der Klebfuge ist auf Bereiche mit hohen Momentengradienten beschränkt. In gleichmäßig linienförmig belasteten Alu-CFK-Hybridträgern ist die in der Klebfuge auftretende Schubbeanspruchung relativ gering, da die Zug- bzw. Druckkräfte kontinuierlich über eine große Einbindelänge in die CFK-Lamelle eingetragen werden.

$$F_{CFK-Lamelle} = \int \tau(x) \times U_{Klebung} dx \quad (4.14)$$

Die Normalkraftänderung in der CFK-Lamelle kann bei rein momentbeanspruchten Biegeträgern durch den Momentengradienten bezogen auf die Trägerlänge beschrieben werden mit:

$$\frac{dM}{dx} = V \quad (4.15)$$

Damit ergibt sich:

$$\frac{\sigma_{CFK}}{dx} = \frac{V}{I_{Hybrid,effektiv}} z \times \frac{E_{CFK}}{E_{Alu}} \quad (4.16)$$

Unter Annahme einer mittleren Schubspannung verteilt auf die Mantelfläche der CFK-Lamelle ergibt sich:

$$\tau_{Klebfuge} = \left(\frac{V}{I_{Hybrid,effektiv}} z_{Klebfuge} \times \frac{E_{CFK}}{E_{Alu}} \right) \times \frac{A_{CFK}}{U_{Klebfuge}} \quad (4.17)$$

Mittels dieser einfachen Gleichungen lässt sich das Trag- und Verbundverhalten von Alu-CFK-Hybridelementen für den Fall einer elastischen Beanspruchung des Aluminiums ingenieurmäßig vereinfacht beschreiben. In Detailbereichen mit z. B. lokalen Lasteinleitungen oder Trägerendbereichen stößt diese ingenieurmäßige Betrachtung jedoch an ihre Grenzen.

Bei plastischer Beanspruchung des Aluminiums kann, auf der sicheren Seite liegend, von einem ideal nichtverfestigend plastischen Werkstoffverhalten ausgegangen werden. Die CFK-Lamelle wird bis zum Erreichen der Festigkeit als mechanisch ideal-elastisch betrachtet. Die Ermittlung plastischer Kenngrößen für Alu-CFK-Hybridquerschnitte kann im Detail wie folgt realisiert werden:

- Bestimmung der elastischen Grenzdehnung der CFK-Lamelle durch die Begrenzung ihrer Druckspannung,
- Linearer Dehnungsansatz für Gesamtquerschnitt,
- Ermittlung der Lage h_{el} als Grenze der elastischen Dehnung über die Profilhöhe,
- Ermittlung der elastischen und plastischen Flächenanteile im Aluminium
- Ermittlung der resultierenden Momentenanteile und des Grenzmomentes $M_{pl,y}$.

Die elastischen und plastischen Traganteile des Aluminiums berechnen sich mit:

$$M_{el,Alu} = \sum R_{p0,2,Alu} \times \frac{I_{y,el,Alu}}{h_{el,Alu}}, \quad (4.18)$$

mit: $I_{y,el,Alu}$ Trägheitsmoment des nicht plastizierenden Aluminiumbereiches,

$h_{el,Alu}$ Querschnittshöhe des nicht plastizierenden Aluminiumbereiches.

$$M_{pl,Alu} = \sum R_{p0,2,Alu} \times z_{pl,Alu} \times A_{pl,Alu}, \quad (4.19)$$

mit: $A_{pl,Alu}$ plastische Querschnittsfläche Aluminium,

$z_{pl,Alu}$ Entfernung zwischen dem Schwerpunkt der plastischen Aluminiumfläche und dem Schwerpunkt des Hybridquerschnitts.

Die elastische Momententragfähigkeit der CFK-Lamellen berechnet sich mit:

$$M_{el,y,CFK} = \sum F_{CFK} \times z_{CFK,Kraftschwerpunkt}, \quad (4.20)$$

$$F_{CFK} = A_{CFK} \times \frac{\sigma_{CFK,aussen} - \sigma_{CFK,innen}}{2}, \quad (4.21)$$

$$\sigma_{CFK,aussen} = f_{u,CFK}^-, \quad (4.22)$$

mit: $f_{u,CFK}^-$ Druckfestigkeit CFK-Lamelle

$$\sigma_{CFK,innen} = \sigma_{CFK,aussen} \times \frac{z_{CFK,aussen}}{z_{CFK,aussen} - d_{CFK}}, \quad (4.23)$$

mit: $z_{CFK,aussen}$ Entfernung der äußeren CFK-Faser vom Schwerpunkt des Gesamtquerschnitts,

d_{CFK} Dicke der CFK-Lamelle.

$$z_{CFK-Kraftschwerpunkt} = z_{CFK,innen} + \left(\frac{d_{CFK}}{3} \right) \times \left(\frac{\sigma_{CFK,innen} + 2\sigma_{CFK,aussen}}{\sigma_{CFK,innen} + \sigma_{CFK,aussen}} \right). \quad (4.24)$$

Die plastische Querschnittstragfähigkeit des Alu-CFK-Hybridquerschnitts ergibt sich mit:

$$M_{pl,y,Alu-CFK} = M_{el,y,Alu} + M_{pl,y,Alu} + M_{el,y,CFK}. \quad (4.25)$$

4.1.3 Ausgangswerkstoffe

Alu-CFK-Hybridelemente bestehen im Wesentlichen aus den Ausgangswerkstoffen Aluminium, CFK-Lamellen und einem Klebstoff als Verbindungsmittel.

Aluminium

Mechanische Eigenschaften

Für die Anwendung in Alu-CFK-Hybridelementen ist es sinnvoll, Aluminiumwerkstoffe zu verwenden, die hohe Festigkeiten und eine definierte Mindestbruchdehnung aufweisen. Eine hohe Streckgrenze des Aluminiumwerkstoffs bewirkt eine hohe elastische Momententragfähigkeit des Alu-CFK-Hybridelementes. Das Erreichen der CFK-Lamellenfestigkeit setzt ein Plastizieren des Aluminiums voraus. Damit kann die hohe Festigkeit der CFK-Lamelle nur genutzt werden, wenn die Bruchdehnung des Aluminiumwerkstoffs größer ist als die Bruch-

dehnung der CFK-Lamelle. Diese Bedingung wird von den in Tabelle 4-1 vorgestellten Aluminiumwerkstoffen erfüllt.

	EN AW-6005A T6 stranggepresst $t \leq 5 \text{ mm}$	EN AW-6061 T6 stranggepresst $t \leq 5 \text{ mm}$	EN AW-7020 T6 stranggepresst $t \leq 40 \text{ mm}$
E-Modul $[N/mm^2]$	70.000		
Dehngrenze $R_{p0,2} [N/mm^2]$	225	240	290
Zugfestigkeit $R_m [N/mm^2]$	270	260	350
Bruchdehnung min $A_{50 \text{ mm}} [\%]$	6	7	8

Tabelle 4-1: Eigenschaften verschiedener Aluminiumwerkstoffe (Hesse, 2007)

Ergebnisse eines Zugversuchs an einem Probekörper des Aluminiumwerkstoffs EN AW-6005A T6 sind in Abbildung 4.2 dargestellt.

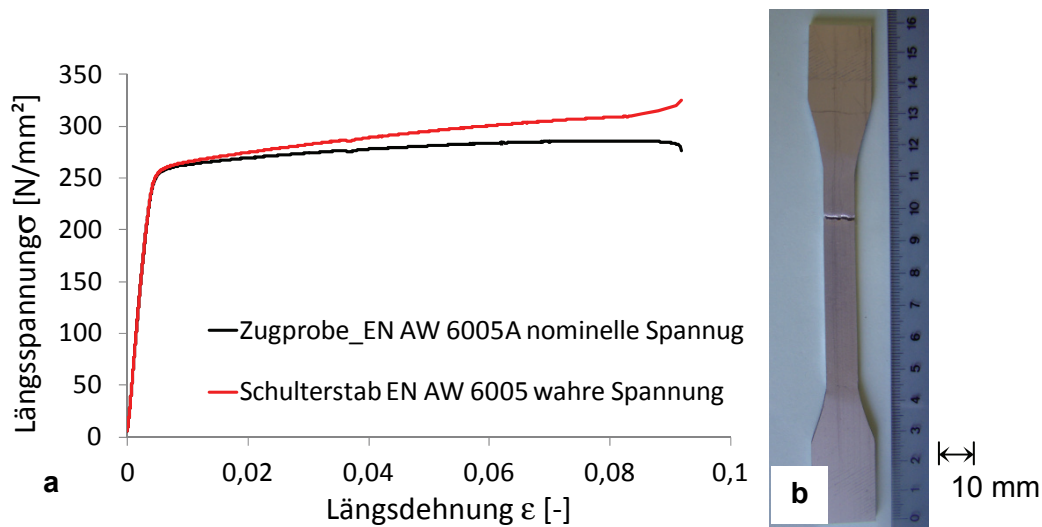


Abbildung 4.2: Vergleich zwischen nominellen Spannungen σ_{nominell} und wahren Spannungen σ_{wahr} an einer Aluminiumzugprobe aus EN AW-6005A T6; a: Spannungs-Dehnungs-Diagramm; b: Zugprobe nach Bruch

Abbildung 4.3 zeigt die Bruchflächen verschiedener Aluminiumzugproben der Aluminiumlegierung EN AW 6005A T6. Eine Besonderheit ist dabei das ausgeprägt plattenartige Lamellenbruchbild, was auf den Herstellungsprozess der stranggepressten Probe und deren grobkörniger Gefügestruktur zurückzuführen ist.

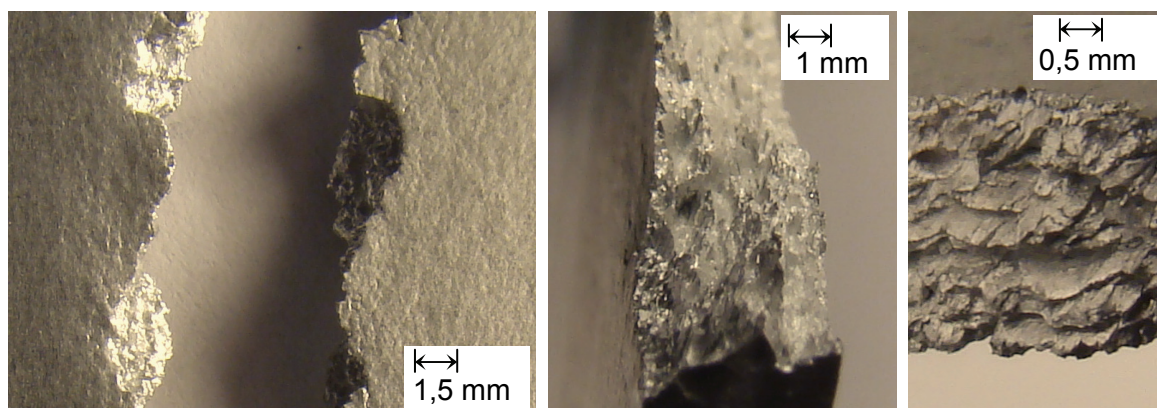


Abbildung 4.3: Bruchflächen von Zugproben einer stranggepressten T6 Aluminiumlegierung

Bei Zugversuchen an Probekörpern aus Aluminiumlegierungen mit dem Werkstoffzustand T6 ist der Einschnürungseffekt kurz vor Versagen des Probekörpers im Vergleich zu Stahlzugproben nur schwach ausgeprägt. Weiterhin ist der plastische Dehnungsanteil bei Aluminiumlegierungen mit hoher Dehngrenze ($R_{p0,02} > 200 \text{ N/mm}^2$) i. Allg. geringer als bei Zugproben aus niederfesten Aluminiumlegierungen.

Oberflächeneigenschaften

Aluminiumlegierungen können verschiedenartige Oberflächenstrukturen aufweisen. Eine genaue Kenntnis über die vorliegende Oberflächenstruktur ist insbesondere notwendig, um adhäsive Eigenschaften der Oberfläche bewerten zu können. Dabei sind sowohl die Struktur als auch die Festigkeit der Oberfläche zu beachten. Neben Verunreinigungen wie Öl und andere Anhaftungen können auch Oxidationsvorgänge die Eignung der Oberfläche zum Kleben beeinträchtigen.

Das Anodisieren von Aluminiumoberflächen ist eine effektive Methode zur Verbesserung der Adhäsionsfähigkeit. Das hierbei verwendete Verfahren wird als Eloxal-Verfahren bezeichnet (Hofmann, et al., 2004). Durch Anwendung des Eloxal-Verfahrens wird auf der Oberfläche des Aluminiums eine definierte Aluminiumoxidschicht mit der Dicke von $5 \mu\text{m} \leq t \leq 25 \mu\text{m}$ erzeugt. Im Gegensatz zu Überzugverfahren entsteht hier keine zusätzliche Adhäsionsfuge, sondern das Aluminiumoxid entsteht direkt aus dem Aluminiumsubstrat. Das führt zu einer sehr porösen Oxidschicht, die neben einer vergrößerten Oberfläche auch sehr hohe strukturelle Festigkeiten aufweist. Wesentliche Eigenschaften der anodisierten Oberfläche sind:

- die definierte Oxidschichtdicke Al_2O_3 ,
- eine vergrößerte Oberfläche und hohe Porosität durch Al_2O_3 Schuppen,
- die sehr gute Haftfestigkeit für Klebstoffe,
- eine verbesserte Verschleißfestigkeit infolge der hohen Härte des Al_2O_3 und den guten Verbundeigenschaften mit dem Aluminiumsubstrat.

Die Eigenschaften sind stark von den erzeugten Schichtdicken des Aluminiumoxids abhängig (Hofmann, et al., 2004).

Abbildung 4.4 zeigt unterschiedliche Aluminiumoberflächen einer bestimmten Aluminiumlegierung. Die dargestellten Aluminiumwerkstoffe entstammen aus einem Strangpressvorgang, wurden aber mit verschiedenartigen Eloxal-Verfahren nachbehandelt.

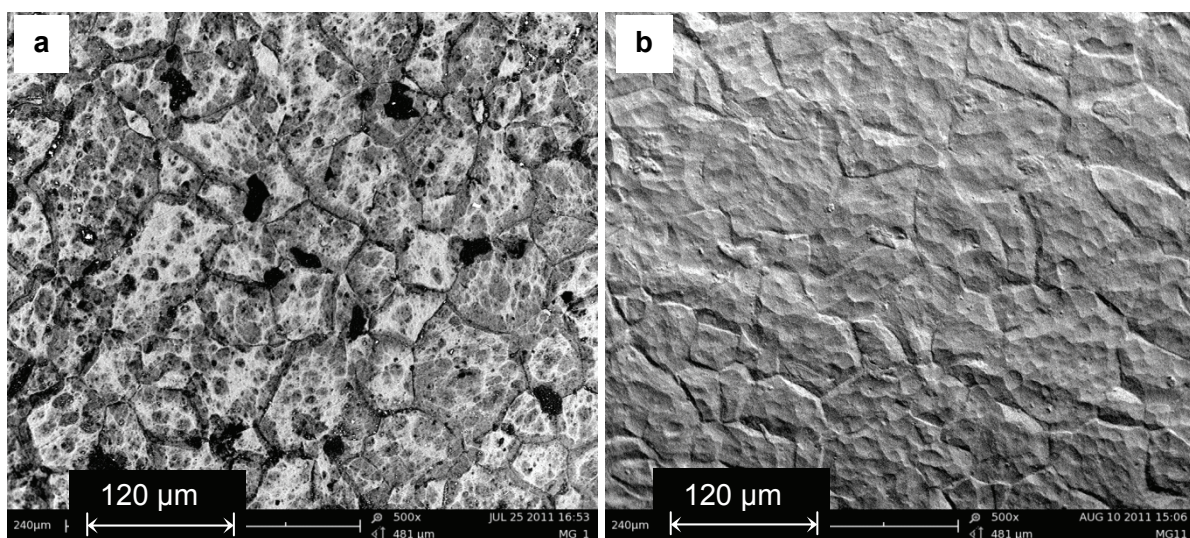


Abbildung 4.4: Oberflächen einer Aluminiumlegierung; a: anodisiert mit offenporiger Oberfläche; b: nach dem Anodisieren verdichtet

Das Anodisieren der Aluminiumoberfläche verbessert die adhäsiven Eigenschaften gegenüber Klebstoffen, da der unausgehärtete Klebstoff in eine sehr zerklüftete Oberfläche eindringen kann und sich in den Hinterschneidungen der Aluminiumoberfläche verspannen kann.

Elektrische Eigenschaften

Bei Hybridsystemen, die aus unterschiedlichen Werkstoffen zusammengesetzt werden, ist die Betrachtung der elektrischen Eigenschaften aller verwendeten Ausgangswerkstoffe von wesentlicher Bedeutung für die Bewertung der Dauerhaftigkeit eines derartigen Werkstoffverbundes. Jeder elektrisch leitfähiger Werkstoff ist gekennzeichnet durch ein spezifisches elektrisches Standardpotential E° . Ein Potenzialunterschied führt bei der direkten Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe dazu, dass ein Kontaktstrom fließt. Verbunden damit ist die Kontaktkorrosion, bei der das Material oxidiert, welches das niedrigere elektrische Potenzial aufweist. Eine Zusammenstellung der elektrischen Potenziale für unterschiedliche Metalle und Nichtmetalle liefert Tabelle 4-2.

	elektrisches Potenzial E° [V]
Kupfer $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^+$	0,337
Kupfer $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+}$	0,16
Eisen $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$	-0,04
Eisen $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	-0,44
Aluminium $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+}$	-1,66
Kohlenstoff	+0,75

Tabelle 4-2: Standardpotential ausgewählter Metalle und Nichtmetalle

Für den Aluminium-Kohlenstofffaserverbund bedeutet das, dass der direkte Kontakt zwischen Aluminium und Kohlenstofffaser zu einem Oxidieren des Aluminiums und dem Reduzieren des Kohlenstoffs führt. Die elektrische Isolierung zwischen Aluminium und Kohlenstofffaser ist daher eine Grundvoraussetzung für die Herstellung eines dauerhaften Alu-CFK-Hybridsystems. Diese Aufgabe wird von der Klebschicht und der nichtleitfähigen Aluminiumoxidschicht übernommen, die den strukturellen Verbund zwischen Aluminium und CFK herstellt.

Eigenschaften der CFK-Lamelle

Experimentelle Untersuchungen an CFK-Lamellen verschiedener Hersteller zeigen, dass die räumliche Anordnung und Verteilung der Kohlenstofffasern in der Kunststoffmatrix wesentlich von der Geometrie der CFK-Lamelle abhängt. CFK-Lamellen mit geringer Dicke weisen bei vergleichbarer Herstellungstechnologie generell eine gleichmäßigere Verteilung der Kohlenstofffasern auf als CFK-Lamellen mit größeren Abmessungen. Für vergleichende Betrachtungen werden Schliffbilder unterschiedlicher CFK-Lamellen senkrecht und parallel zur Faserrichtung gefertigt. Die Schliffbilder für die unterschiedlichen CFK-Lamellen sind in Abbildung 4.5 dargestellt.

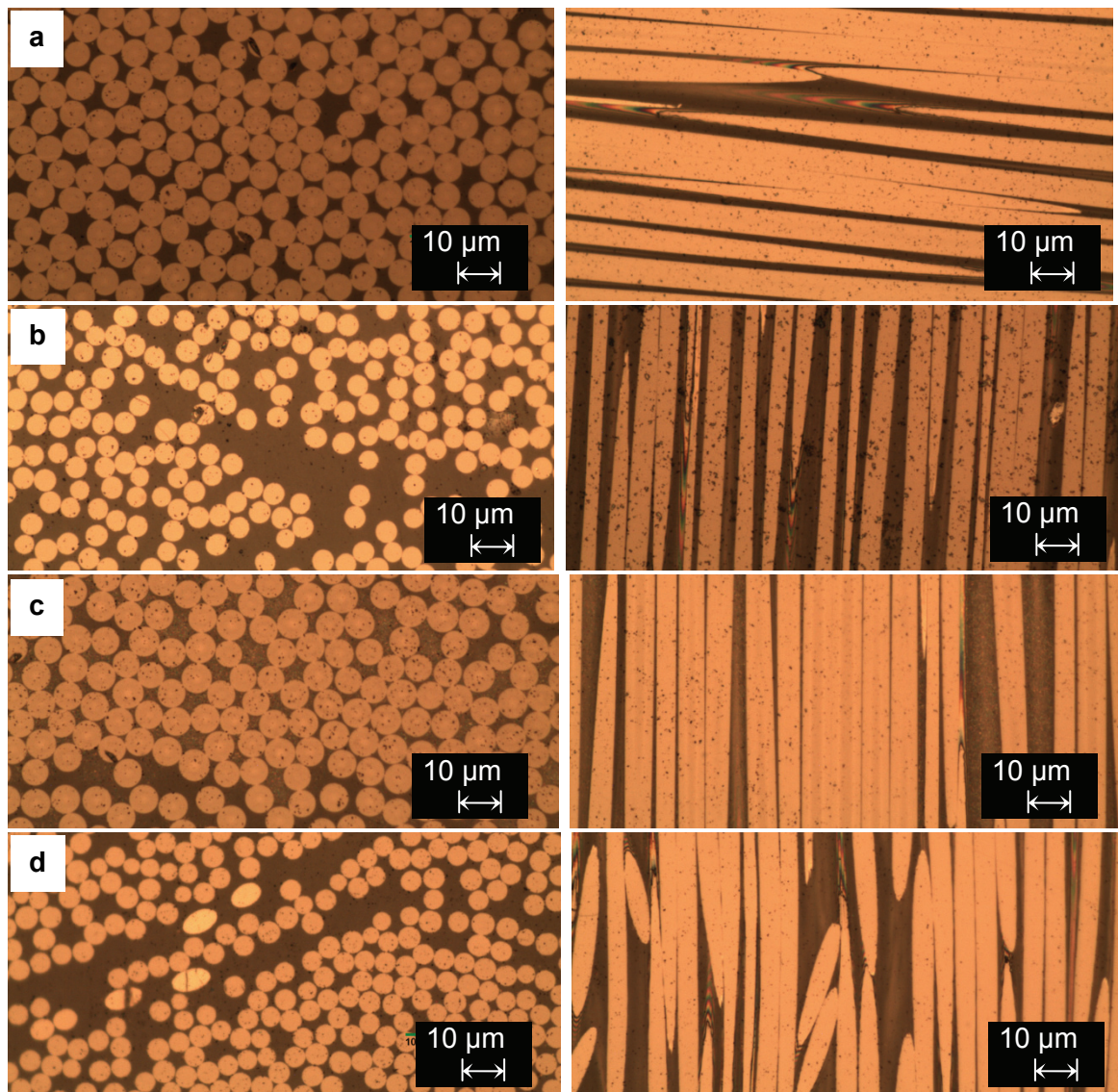


Abbildung 4.5: Schlichtbilder unterschiedlicher CFK-Lamellen rechtwinklig und parallel zur Faserrichtung mit dem Querschnitt b x t; a: 50 x 1,4 mm; b: 24 x 2,5 mm; c: 30 x 4 mm; d: 30 x 5 mm

Die verschiedenartigen CFK-Lamellen weisen in den dargestellten repräsentativen Ausschnitten der Schlichtbilder deutliche Unterschiede in Lage und Gleichmäßigkeit der Anordnung der Kohlenstofffasern innerhalb der Kunststoffmatrix auf. Dabei ist zu beachten, dass alle hier untersuchten CFK-Lamellen mittels Pultrusionsverfahren hergestellt wurden. Bei geringen CFK-Lamellendicken können die Kohlenstofffaser-Rovings innerhalb des Herstellungswerkzeuges während der Pultrusion sehr genau positioniert werden. Bei größeren CFK-Lamellendicken treffen sehr viele Rovings auf einen konzentrierten Raum zusammen, die alle in die Pultrusionsform hineinlaufen. Hier können in den Grenzflächen zwischen den einzelnen Rovings Unregelmäßigkeiten entstehen, die nach der Aushärtung zur Ausbildung von Matrixnestern führen. Nach der Aushärtung der Klebstoffmatrix bleiben diese Diskontinuitäten bestehen und beeinflussen das mechanische Materialverhalten der CFK-Lamelle negativ.

Experimentelle Untersuchungen zum Versagensmechanismus einer CFK-Lamelle unter Zug- bzw. Druckbeanspruchung sind in (Schürmann, 2007) erläutert und konnten in eigenen Versuchen bestätigt werden. Normalkraftbeanspruchungen, rechtwinklig zur Faserlängsrichtung,

werden im Wesentlichen von der Matrix der CFK-Lamelle abgetragen, wobei die Kohlenstofffasern nur die Querkzugbeanspruchungen aufnehmen. CFK-Lamellen sind somit für eine solche Beanspruchungssituation nur eingeschränkt geeignet.

Es ist eine grundlegende Unterscheidung zwischen den Zug- und Druckeigenschaften von CFK-Lamellen zu treffen. Die Zugeigenschaften werden von den Unregelmäßigkeiten der Faseranordnung innerhalb der CFK-Lamelle nur geringfügig beeinflusst. Unter Zugbeanspruchung werden die Fasern gestreckt. Die Höhe der maximal aufnehmbaren Zugspannung ist im Wesentlichen abhängig von:

- dem Fasergehalt,
- den Eigenschaften der Fasern,
- der Faserorientierung,
- den Imperfektionen.

Bei Druckbeanspruchung werden die Fasern in der Matrix gestaucht. Die Fasern weisen theoretisch eine sehr hohe Druckfestigkeit auf, die sie jedoch praktisch nicht erreichen können. Die Steifigkeit der Kunststoffmatrix hat ebenfalls einen Einfluss auf die Druckfestigkeit der CFK-Lamelle, da die Matrix einen stabilisierenden Effekt auf die Kohlenstofffasern ausübt und so einem Stabilitätsversagen der Fasern bei axialer Druckbeanspruchung entgegenwirkt. Unter steigenden Druckbeanspruchungen reagieren CFK-Lamellen, in der Mikrostruktur des Faser-Matrix-Systems betrachtet, schließlich mit einem Stabilitätsversagen. Die mechanische Reaktion von CFK-Lamellen unter Druckbeanspruchung zeigt bei geringen Beanspruchungen zunächst ein annähernd lineares Last-Verformungs-Verhalten. Bei höheren Beanspruchungen führen nichtlineare geometrische Effekte schließlich zu einem Stabilitätsversagen des Faser-Matrix-Systems (Schürmann, 2007). Die Höhe der maximal aufnehmbaren Druckspannung ist dabei abhängig von:

- Fasergehalt und Eigenschaften der Fasern,
- Homogenität der Faserverteilung in der Matrix,
- Faserorientierung und Imperfektionen,
- der Steifigkeit der Matrix.

Die Schubfestigkeit der CFK-Lamelle senkrecht zur Faserlängsrichtung ist für Lasteinleitungsvorgänge mit schubbeanspruchten Klebverbindungen von besonderer Bedeutung, da lokale Überbeanspruchungen im Lasteinleitungsbereich ein Schubversagen des Faser-Matrix-Systems hervorrufen können.

Experimentelle Zug- und Druckfestigkeitsuntersuchungen

Experimentelle Untersuchungen der Druck- und Zugeigenschaften von CFK-Lamellen zeigen erwartungsgemäß ein belastungsrichtungsabhängiges Festigkeitsverhalten. Bei den geführten Untersuchungen ist die gleichmäßige Lasteinleitung eine Grundvoraussetzung für die Ermittlung der Festigkeitseigenschaften der CFK-Lamelle. Daher werden Lasteinleitungsgebiete verstärkt und spezielle Auflager hergestellt. Für die Untersuchung der Zugeigenschaften ist es erforderlich, die Einspannbereiche der CFK-Lamelle, wie in Abbildung 4.6a dargestellt, mit auflaminierten CFK-Lamellen zu verstärken.

Das Versagen von CFK-Lamellen unter Zugbeanspruchung erfolgt schlagartig. Es wird ausgelöst durch ein sprödes Initialversagen einzelner Fasern. Die vorhandene Last muss dann auf einen kleineren Tragquerschnitt umgelagert werden, was zur Überbeanspruchung weiterer Fasern führt. Ein typisches Versagensbild von CFK-Lamellen unter Zugbeanspruchung ist in Abbildung 4.6 b und c dargestellt.

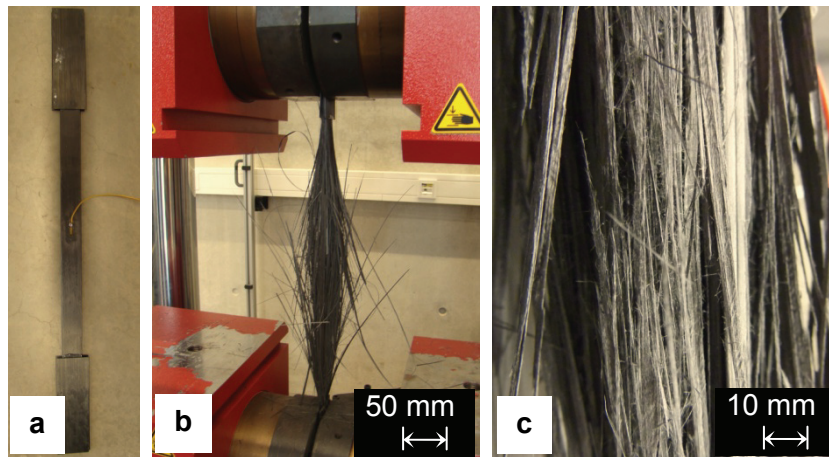


Abbildung 4.6: Zugversuch an einer CFK-Lamelle; a: CFK-Lamelle mit DMS und aufgeklebten CFK-Lamellen im Auflagerbereich zur Lastübertragung; b und c: Versagensbild einer CFK-Lamelle unter Zugbeanspruchung

Die Steifigkeit und Zugfestigkeit der CFK-Lamelle hängt im Wesentlichen von der Steifigkeit der Kohlenstofffasern und deren Füllgrad ab. Verschiedenartige Kohlenstofffasertypen werden im Anhang in Abschnitt A.5.1 vorgestellt. Zugversuche an ausgewählten CFK-Lamellen mit zwei unterschiedlichen Kohlenstofffasern (mittelmodulige IMS und hochmodulige UM) zeigen stark unterschiedliche Steifigkeiten mit hohen Zugfestigkeiten. In Abbildung 4.7 werden die Ergebnisse aus Zugversuchen an unterschiedlichen CFK-Lamellen dargestellt. Aus dem Spannungs-Dehnungs-Verlauf kann die Steifigkeit der CFK-Lamelle abgeleitet werden. Die Steifigkeit von CFK-Lamellen unter Zugbeanspruchung ist belastungsabhängig. Unter Zuglast werden die einzelnen Kohlenstofffasern gestreckt und vorhandene Imperfektionen ausgeglichen. Die Steifigkeit der CFK-Lamelle nimmt daher unter steigender Längsbelastung zu. Der Bruch der CFK-Lamellen erfolgte bei $\sigma_{\text{längs, nominell}} > 2.000 \text{ N/mm}^2$.

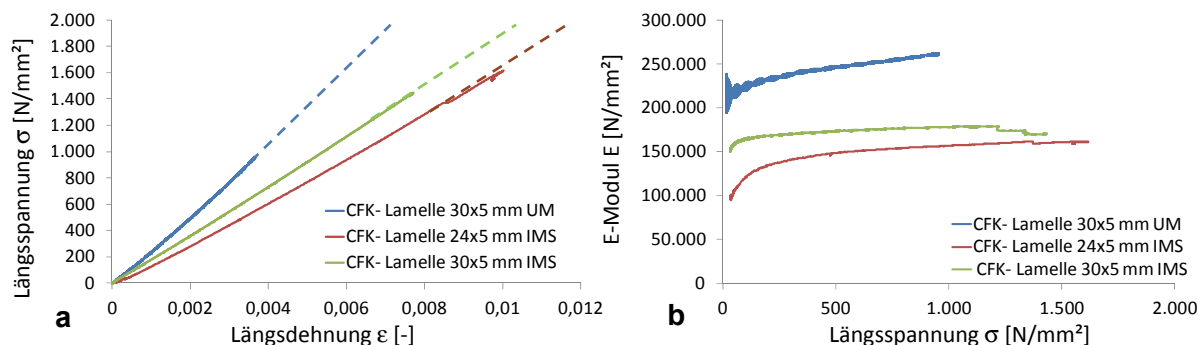


Abbildung 4.7: Ergebnisse für Zugversuche an CFK-Lamellen; a: Spannungs-Dehnungs-Verlauf; b: E-Modul in Abhängigkeit der Normalspannung

Unter Druckbeanspruchung reagieren CFK-Lamellen in Abhängigkeit der verwendeten Kohlenstofffaser sehr unterschiedlich. Die Verwendung hochmoduliger (UHM, UM und HM) Kohlenstofffasern führt zu CFK-Lamellen mit hoher Steifigkeit, aber nur geringer Bruchfestigkeit. Die Bruchdehnung ist dann dementsprechend gering. Das Versagen wird eingeleitet durch ein Stabilitätsversagen einzelner Fasern. Analog zum Zugversuch verkleinert sich damit der effektive Tragquerschnitt der CFK-Lamelle, was zu einem schlagartigen Versagen führt.

CFK-Lamellen aus mittelmoduligen Kohlenstofffasern (IM und IMS) weisen geringere Steifigkeiten aber höherer Druckfestigkeiten auf, da das Stabilitätsversagen der Kohlenstofffasern erst bei höherer Belastung eintritt. Die stabilisierende Wirkung der Kunststoffmatrix kann hier

effektiver genutzt werden, da das Verhältnis zwischen axialer Druckbeanspruchung und gleichzeitig vorhandener Stauchung geringer ist. Die Bruchdehnung ist wesentlich größer als bei hochmoduligen CFK-Lamellen.

Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass die Druckfestigkeit von CFK-Lamellen bei niedrigen Temperaturen wesentlich größer ist als bei hohen Temperaturen. Das kann mit der temperaturabhängigen Steifigkeit der Kunststoffmatrix direkt in Zusammenhang gebracht werden. In numerischen Untersuchungen kann der Einfluss einer mechanischen Stabilisierung von einaxialen Faser-Matrix-Systemen senkrecht zur Hauptbeanspruchungsrichtung dargestellt werden. Ausgewählte numerische Betrachtungen werden auf Seite 109ff. diskutiert.

Experimentelle Untersuchungen belegen, dass die Querschnittsabmessungen von CFK-Lamellen einen wesentlichen Einfluss auf die Druckfestigkeit besitzen. In CFK-Lamellen mit geringerer Dicke können die Kohlenstofffasern durch Aufbringen einer Vorspannung so ausgerichtet werden, dass die Imperfektionen der Fasern gering gehalten werden. Mit steigender Lamellendicke ist das immer weniger möglich, sodass lokale Imperfektionen einzelner Fasern Störquellen im homogen ausgerichteten Faser-Matrix-System darstellen.

Das Versagen der CFK-Lamelle infolge Druckbeanspruchung wird immer initiiert durch einen Zwischenfaserbruch. Das Versagensbild einer CFK-Lamelle infolge Druckbeanspruchung ist in Abbildung 4.8 dargestellt.



Abbildung 4.8: Versagensbild einer CFK-Lamelle infolge Druckbeanspruchung, ausgelöst durch Zwischenfaserbruch

Für die Durchführung von Druckversuchen an CFK-Lamellen ist die Ausbildung der Lastleitung in die CFK-Lamelle von besonderer Bedeutung. In den experimentellen Untersuchungen werden die CFK-Lamellen in spezielle Steckschuhe aus hochfesten Stahl eingefasst (siehe Abbildung 4.9a). Das Stabilitätsversagen der CFK-Lamellen senkrecht zur Belastungsachse wird durch die Anordnung mehrerer strukturell verklebter CFK-Lamellen zu einem gedrungenen Prüfkörper behindert.

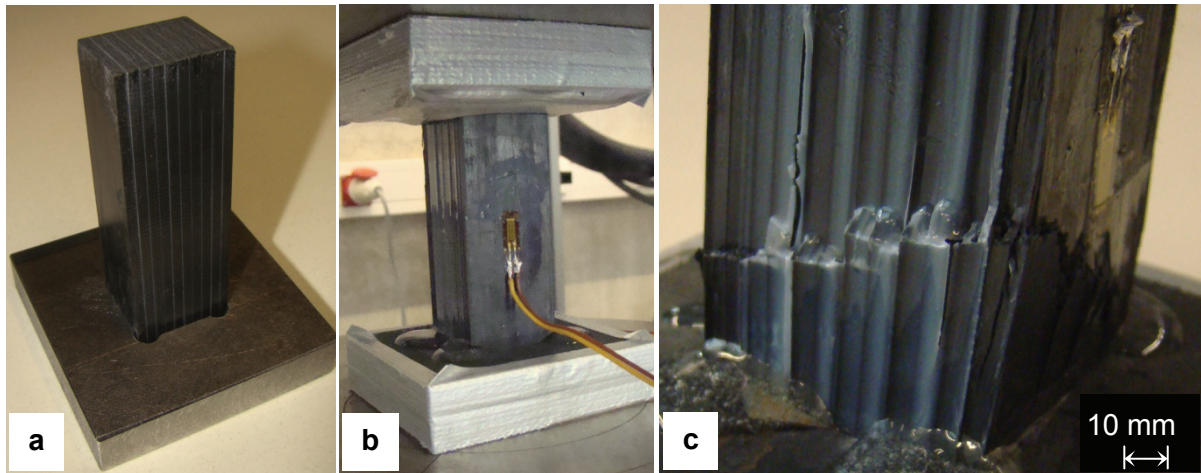


Abbildung 4.9: Druckversuch an einer CFK-Lamelle; a: Prüfkörper in Stahleinfassung; b: Versuchsdurchführung in Prüfmaschine; c: Bruchbild infolge eines Druckversagens

Der Bruch der CFK-Lamelle wird durch ein lokales Versagen in einem Eckpunkt des Prüfkörpers eingeleitet. Der Probekörper stellt sich anschließend schief und versagt schlagartig. Das Spannungs-Dehnungs-Verhältnis und der belastungsabhängige E-Modul sind für unterschiedliche CFK-Lamellen in Abbildung 4.10 dargestellt. Im Gegensatz zu den Zugversuchen ist hier keine Erhöhung des E-Moduls bei steigender Druckbeanspruchung festzustellen. Das ist in der inneren Struktur der CFK-Lamelle begründet, da die Außermittigkeiten der einzelnen Kohlenstofffasern bei steigender Belastung zunehmen. Unmittelbar vor dem Versagen nimmt die Steifigkeit der druckbeanspruchten CFK-Lamelle ab.

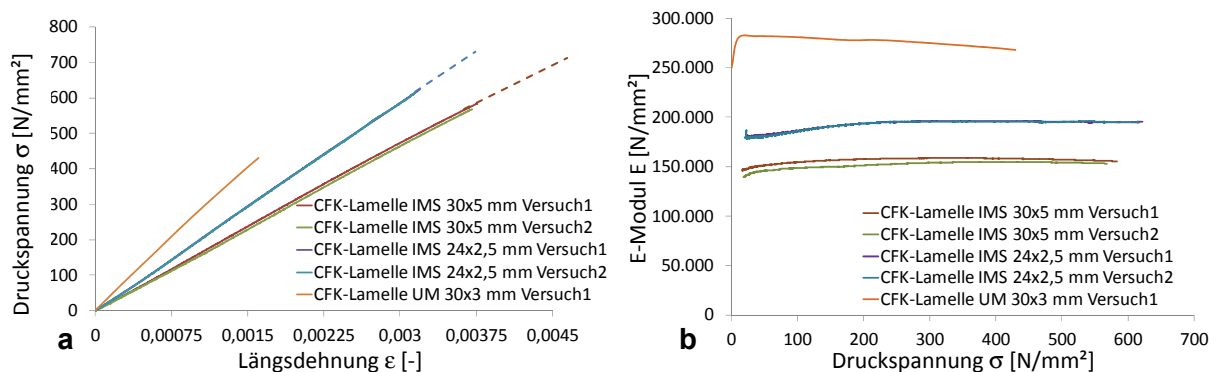


Abbildung 4.10: Ergebnis von Druckversuchen an unterschiedlichen CFK-Lamellen; a: Spannungs-Dehnungs-Verlauf; b: E-Modul in Abhängigkeit der Beanspruchungshöhe

Die Querdehnzahl ist von der Beanspruchungsrichtung und Größe nur bedingt abgänglich. Die belastungsabhängigen Werte der Querdehnzahl sind in Abbildung 4.11 dargestellt.

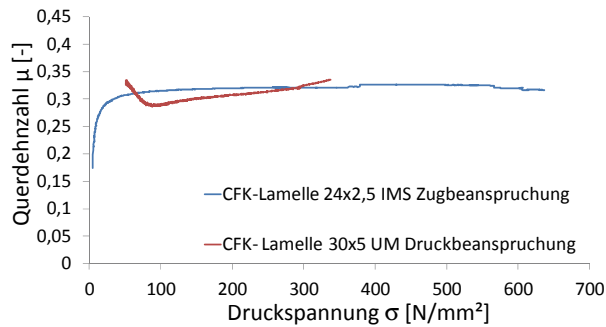


Abbildung 4.11: Querdehnzahl in Abhängigkeit der Längsspannung für unterschiedliche CFK-Lamellen und Beanspruchungsrichtungen

Numerische Abbildung

Die numerische Analyse einer CFK-Lamelle in Mikroebene ermöglicht eine prinzipielle Darstellung des Last-Verformungs-Verhaltens in einem lokal begrenzten Gebiet. In dem betrachteten CFK-Lamellenausschnitt ist ein geringer Faserfüllgrad von $\text{Vol}_{\text{Faser}} = 45\%$ realisiert. Wesentliche Materialkennwerte sind:

- $E_{\text{C-Faser}} = 300.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$, $\mu_{\text{C-Faser}} = 0,25$,
- $E_{\text{Matrix}} = 1.100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$, $\mu_{\text{Matrix}} = 0,42$.

Einzelne Kohlenstofffasern sind rechtwinklig zur Beanspruchungsrichtung mit einer lokalen Imperfektion angeordnet, um eine Stabilitätsbetrachtung des Faser-Matrix-Systems zu ermöglichen. Die betrachtete Geometrie ist in Abbildung 4.12a dargestellt.

Eine Zugbeanspruchung in einer CFK-Lamelle, parallel zur Faserrichtung, führt zur Längsdehnung der Kohlenstofffasern in der Matrix. Die Längskraft in der CFK-Lamelle wird dabei aufgrund der Steifigkeitsdifferenz von Kohlenstofffaser und Matrix fast vollständig von der Kohlenstofffaser aufgenommen. Nichtlineare Geometrieeffekte können hierbei vernachlässigt werden, solange die Fasern ideal in Belastungsrichtung ausgerichtet sind. Fasern, die Imperfektionen aufweisen, werden mit steigender Zugbeanspruchung in Längsrichtung gestreckt. Die Streckung wirkt der Imperfektion entgegen, was eine quasi nachträgliche Versteifung der CFK-Lamelle bewirkt. Dementsprechend ist bei der Auswertung des Normalspannungs-Dehnungs-Verhaltens auch bei hohen Beanspruchungen kein Stabilitätsversagen zu beobachten. In experimentellen Untersuchungen kann eine Zunahme des E-Moduls bei steigender Zugbeanspruchung nachgewiesen werden.

Das Versagen der CFK-Lamelle unter Zugbeanspruchung wird initiiert durch eine lokale Überbeanspruchung einzelner Kohlenstofffasern, speziell im Bereich von Imperfektionen (siehe Abbildung 4.12c). Der Bruch einer einzelnen Kohlenstofffaser führt dann zu einer Überbeanspruchung benachbarter Kohlenstofffasern, die dann ebenfalls versagen. Das spröde Versagen der CFK-Lamelle unter Zugbeanspruchung wird immer in Bereichen initiiert, die verstärkt geometrische Faserimperfektionen aufweisen.

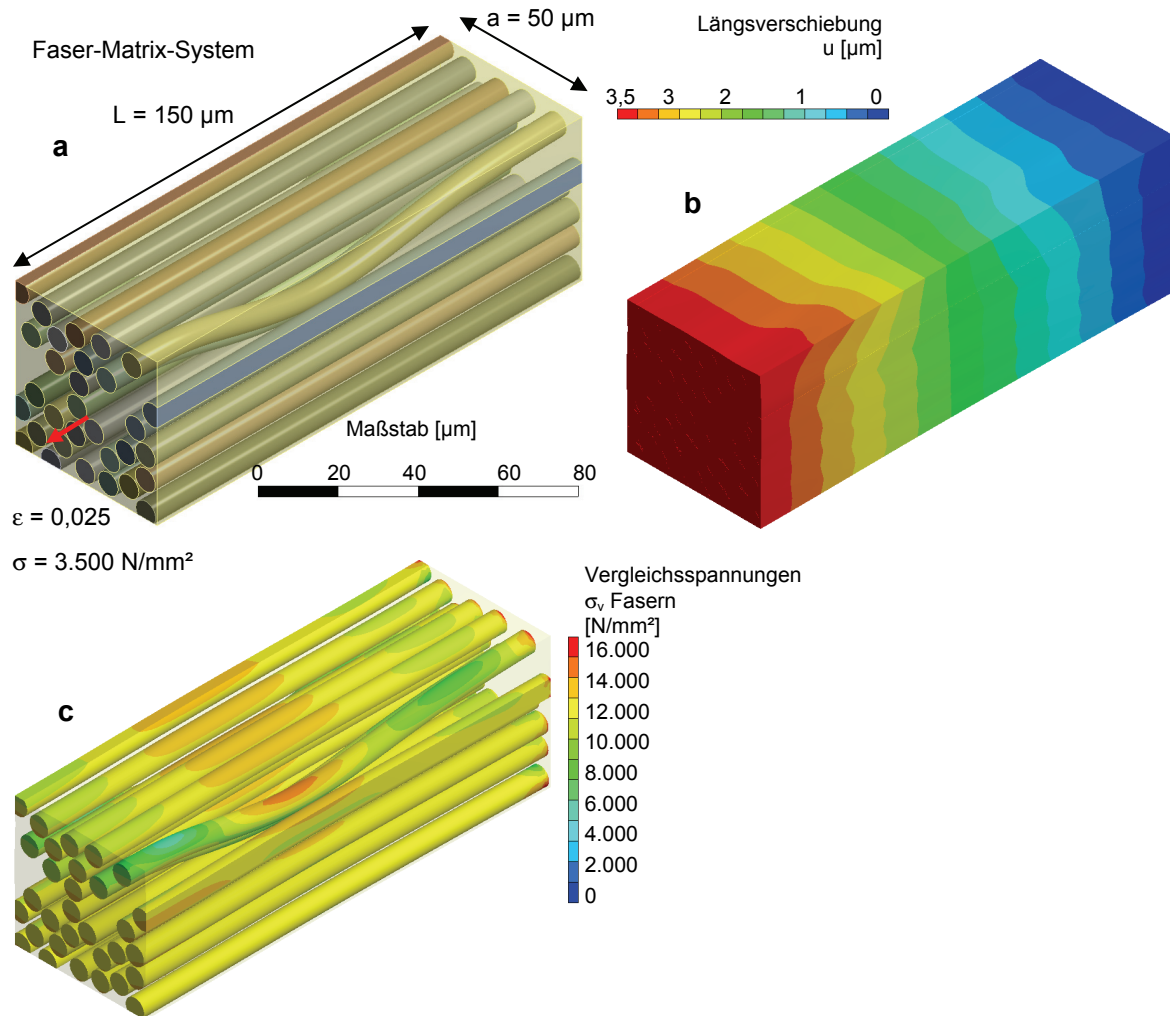


Abbildung 4.12: Ergebnisse der FEM-Analyse einer CFK-Lamelle unter Zugbeanspruchung; a: geometrisches System mit Beanspruchung; b: Verformungen der CFK-Lamelle; c: Vergleichsspannungen in den Kohlenstofffasern

Das betrachtete System ist dreiseitig mit Symmetriebedingungen gehalten. Die Festhaltebedingungen sind für die rückseitige Stirnfläche und zwei benachbarte Seitenflächen definiert. Die Art der seitlichen Stabilisierung hat bei Zugbeanspruchungen nur einen geringen Einfluss auf die Auslenkung der Kohlenstofffaser normal zur Hauptbeanspruchungsrichtung. Die Spannung innerhalb der Kohlenstofffasern ist im betrachteten Modell relativ homogen ausgebildet. Im Bereich der Imperfektion treten erhöhte Spannungen auf, die bei Steigerung der Zugbeanspruchung letztendlich einen Bruch der CFK-Lamelle initiieren. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des numerisch betrachteten CFK-Lamellenausschnitts ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Das Spannungs-Dehnungs-Verhältnis der Kohlenstofffaser ist nahezu linear ausgebildet. Infolge der Streckung der gekrümmten Kohlenstofffasern nimmt der E-Modul mit steigender Zugdehnung geringfügig zu.

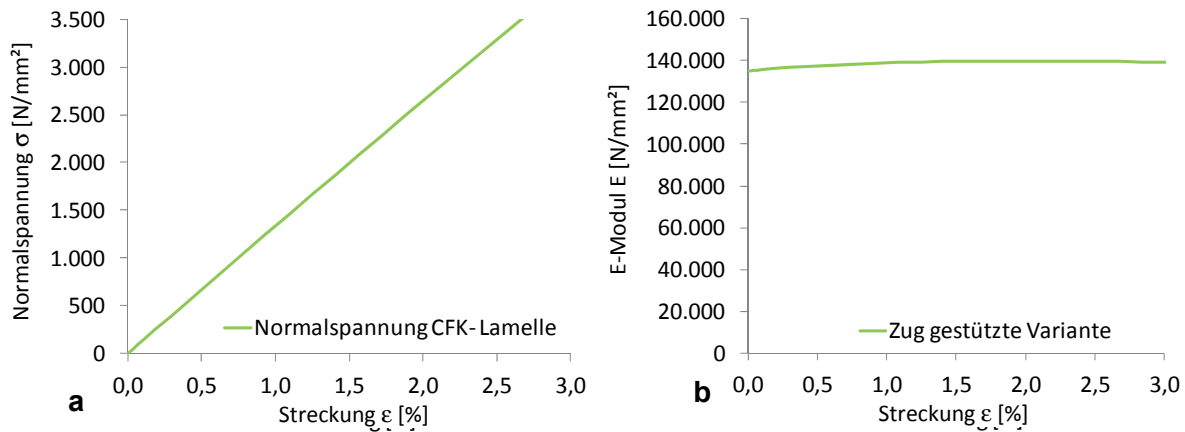


Abbildung 4.13: Ergebnisse der FEM-Analyse eines zugbeanspruchten CFK-Lamellen-Mikromodells; a: Normalspannungs-Dehnungsbeziehung; b: Längssteifigkeit in Abhängigkeit der Dehnung

In druckbeanspruchten CFK-Lamellen sind Stabilitätsbetrachtungen entscheidend für die Analyse des Versagensmechanismus. Für die numerische Analyse des Last-Verformungsverhaltens unter Druckbeanspruchung wird das in Abbildung 4.12 dargestellte geometrische Modell unverändert übernommen und die Beanspruchungsrichtung umgekehrt.

Ergebnisse der numerischen Betrachtung eines druckbeanspruchten CFK-Lamellen-Mikromodells sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Die Art und Steifigkeit der Stabilisierung orthogonal zur Beanspruchungsrichtung der CFK-Lamelle hat bei dem druckbeanspruchten Modell einen wesentlichen Einfluss auf die Stabilität der Kohlenstofffasern. In CFK-Lamellen wird diese Stabilisierungswirkung durch die Kunststoffmatrix erzielt.

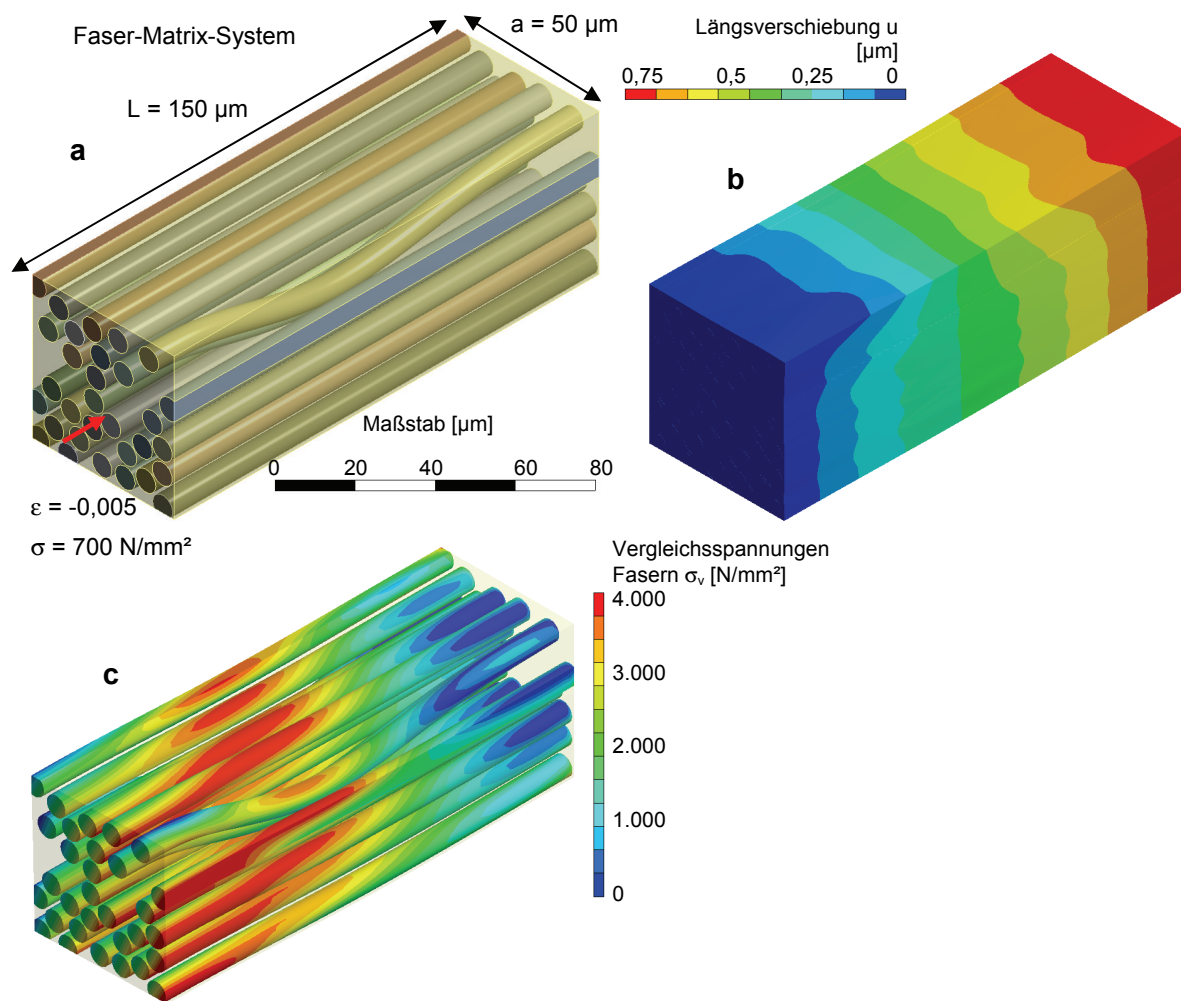


Abbildung 4.14: Ergebnisse der FEM-Analyse einer CFK-Lamelle unter Druckbeanspruchung a: geometrisches System mit Beanspruchung; b: Verformungen der CFK-Lamelle bei Beanspruchung; c: Vergleichsspannungen in den Kohlenstofffasern bei Beanspruchung

Die Wirkungsweise unterschiedlicher Systemstabilisierungen rechtwinklig zur Hauptbeanspruchungsrichtung:

- einer dreiseitigen Lagerung der CFK-Lamelle als reibungsfreie Lagerung an einer Stirnfläche und 2 benachbarten Flanken als stark stabilisierte Variante und
- einer einseitig fixierten Lagerung an der Stirnfläche der CFK-Lamelle als geringfügig stabilisierte Variante.

auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten und der resultierenden Steifigkeit des CFK-Lamellen Mikromodells wird in Abbildung 4.15 gezeigt. Mit Zunahme der Druckspannung werden die Unterschiede zwischen der ungestützten und der stabilisierten Variante deutlich. Die ungestützte Variante zeigt ein plötzliches Abknicken in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung bei ca. 35 % der Druckspannung, die von dem gestützten System aufgenommen werden kann. Aufgrund des geringen Durchmessers der Kohlenstofffasern mit $d = 7 \mu\text{m}$ führen auch sehr geringe Imperfektionslasten, die rechtwinklig zur axialen Belastung auftreten, zu einem Stabilitätsversagen der Kohlenstofffasern. Die Kohlenstofffasern werden dabei von der Matrix und anderen stabilisierenden Elementen gegen ein Ausknicken gehalten. Der Wi-

derstand der seitlich ungestützten Variante gegenüber einem Stabilitätsversagen ist aufgrund der geringen Matrixsteifigkeit niedrig. Es ist ein direkter Zusammenhang zwischen der Vergrößerung der Imperfektionslast und dem Abknicken der Spannungs-Dehnungskurve aus der Axialbelastung festzustellen (siehe Abbildung 4.15a). Die nichtlineare Spannungszunahme innerhalb der Kohlenstofffaser bei Zunahme der Stauchung ist mit der Zunahme der Imperfektionslast gekoppelt. Die Längssteifigkeit des betrachteten CFK-Lamellenausschnitts sinkt mit zunehmender Stauchung ab. Dabei besteht ein deutlicher Unterschied zwischen der seitlich stabilisierten und der nicht stabilisierten Variante.

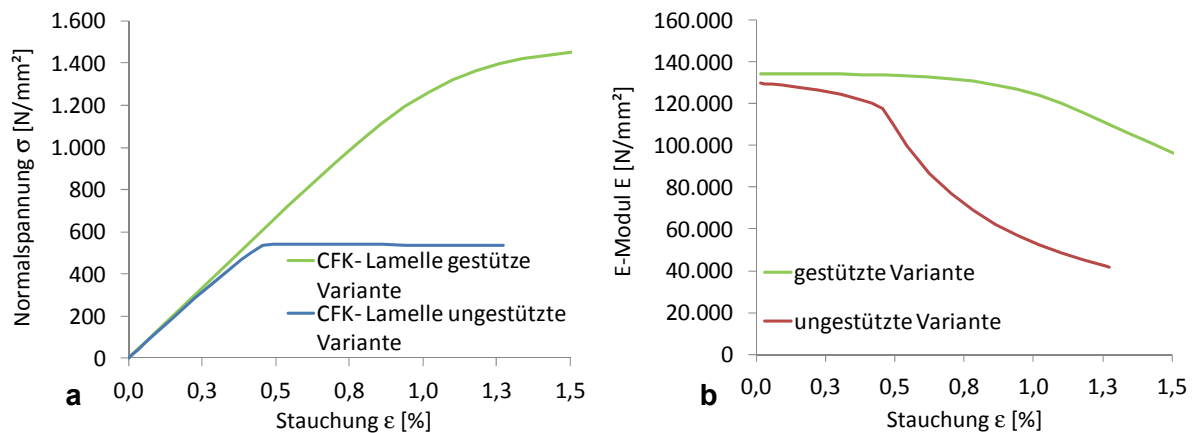


Abbildung 4.15: Ergebnisse der FEM-Analyse eines druckbeanspruchten CFK-Lamellenausschnitts; a: Normalspannungs-Dehnungsbeziehung; b: Längssteifigkeit in Abhängigkeit der Dehnung

Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Druckfestigkeit verschiedenartiger CFK-Lamellen, die auf Seite 105 ff. dargestellt sind, zeigen im Versagensfall ähnliche mechanische Effekte. In der numerischen Analyse eines CFK-Mikromodells unter Druckbeanspruchung kann ein Spannungs-Dehnungs-Verhalten aufgezeigt werden, bei dem nach einer quasi linearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung eine nichtlineare Verformungszunahme erfolgt. Die experimentell ermittelten Daten zeigen dabei, dass die experimentell nachweisbaren Druckfestigkeiten von CFK-Lamellen zwischen den hier gezeigten numerischen Modellen mit unterschiedlichen Stabilisierungseigenschaften einzuordnen sind.

Eigenschaften des Klebstoffs

Bei den betrachteten Alu-CFK-Hybridelementen übernimmt der Klebstoff die Aufgabe, eine ganzheitlich wirksame strukturelle Verbindung zwischen den Substratoberflächen des Aluminiums und der CFK-Lamelle herzustellen. Die experimentelle und numerische Betrachtung des Klebstoffs als Werkstoff stellt eine wesentliche Grundvoraussetzung zur Charakterisierung des Aluminium-CFK-Lamellen-Verbundes dar. Die Klebverbindung soll eine definierte Elastizität aufweisen und bei statischer Beanspruchung des Alu-CFK-Hybridelementes die Lasteinleitung in die CFK-Lamelle realisieren. Für die Auswahl eines geeigneten Klebstoffs und die Kalibrierung der numerischen Materialmodelle ist es notwendig, eine entsprechende Charakterisierung der Klebstoffeigenschaften durchzuführen. Diese untergliedert sich in Analyse:

- der Kurzzeiteigenschaften,
- der Langzeiteigenschaften, des Kriechverhaltens und
- des Temperatureinflusses.

Bei der Wahl eines geeigneten Klebstoffs ist ein Kompromiss zwischen den Anforderungen an eine strukturelle Verbindung und den Anforderungen aus Dauerhaftigkeitskriterien zu finden.

Kurzzeiteigenschaften im Zugversuch

Am Beispiel zweier unterschiedlicher 2K-Polyurethan-Klebstoffe werden die mechanischen Kurzzeiteigenschaften untersucht. Die Eigenschaften des Klebstoffs sind dabei im Wesentlichen abhängig von seiner chemischen Zusammensetzung und der Prüftemperatur. Um einheitliche Prüfbedingungen sicherzustellen, werden Probekörper für Zugprüfversuche nach DIN EN ISO 527-4 (Deutsches Institut für Normung, 1997) angefertigt und mit definierten Prüfbedingungen im Zugversuch getestet. Abbildung 4.16 zeigt die angefertigten Probekörper während der Aushärtung in einer entsprechenden Gussform. Bei der anschließenden Prüfung in der Zugprüfmaschine wurden für die Ermittlung der Dehnung Extensometer verwendet.

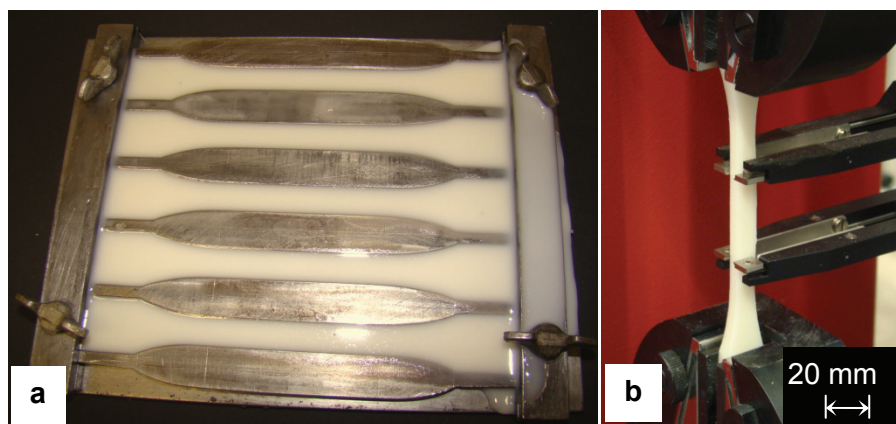


Abbildung 4.16: Probekörper für Zugprüfversuche nach DIN EN ISO 527-4 (Deutsches Institut für Normung, 1997); a: Probekörper vor dem Entformen; b: Durchführung eines Kurzzeit-Zugversuchs

Die experimentell ermittelten nominellen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für zwei unterschiedliche Polyurethanklebstoffe und verschiedene Prüftemperaturen sind in Abbildung 4.17 dargestellt.

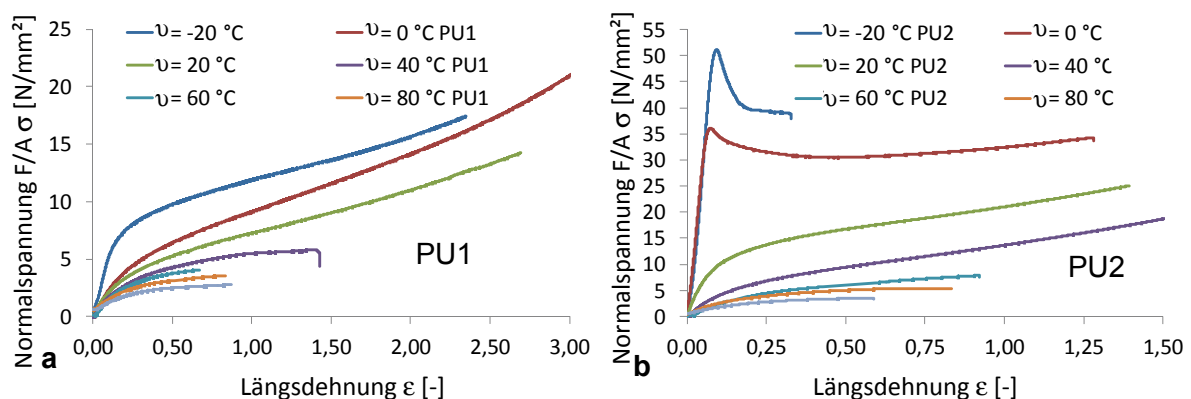


Abbildung 4.17: Zugeigenschaften unterschiedlicher Polyurethanklebstoffe in Abhängigkeit der Prüftemperatur (nominelle Spannungs-Dehnungs-Auswertung)
a: PU1; b: PU2

Die Materialeigenschaften der untersuchten 2K-Polyurethanklebstoffe weisen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Prüftemperatur auf. Der Klebstoff PU1 zeigt ein mechanisches Materialverhalten auf, das zwischen einem hyperelastischen und einem plastischen Materi-

almodell zu beschreiben ist. Niedrige Temperaturen, $\nu \leq 0^\circ\text{C}$, führen dabei ebenso wie hohe Verformungen zu einem Materialverhalten, das durch irreversible Dehnungen charakterisiert wird. Der Klebstoff PU2 zeigt bei Temperaturen $\nu \leq 0^\circ\text{C}$ ein elastisch-plastisches Materialverhalten. Ab einer Prüftemperatur von $\nu \geq 20^\circ\text{C}$ ist ein Übergang von elastischem zu plastischem Materialverhalten nicht mehr sichtbar.

Die numerische Beschreibung des Materialverhaltens der Polyurethanklebstoffe für die Abbildung von Kurzzeitbeanspruchungen ist mit multilinear plastischen oder hyperelastischen Materialmodellen möglich. Damit können jedoch nur Erstbeanspruchungen analysiert werden. Bei länger andauernden Beanspruchungen oder wiederkehrenden Belastungen des Klebstoffs ist zusätzlich das Kriech- und Relaxationsverhalten des Klebstoffs mit zu berücksichtigen.

Langzeiteigenschaften im Kriechversuch

In Kriechuntersuchungen werden die beiden Polyurethanklebstoffe PU1 und PU2 mit unterschiedlichen Lastniveaus beansprucht und hinsichtlich des zeitabhängigen Verformungsverhaltens analysiert. Die mechanische Reaktion des Klebstoffs ist stark belastungsabhängig. Abbildung 4.18 zeigt für die ausgewählten Polyurethanklebstoffe PU1 und PU2 Kriechkurven in Abhängigkeit des Belastungsniveaus.

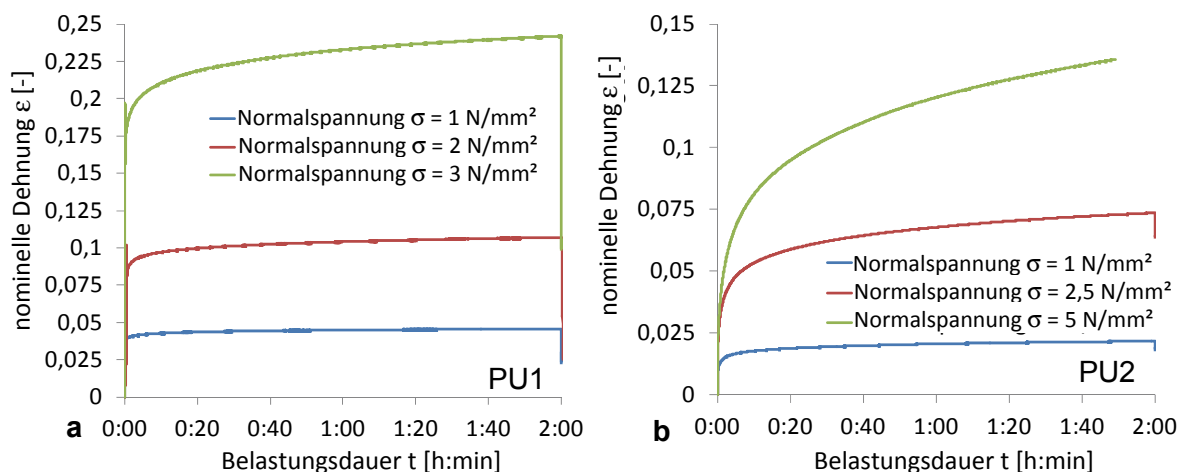


Abbildung 4.18: Kriecheigenschaften unterschiedlicher Polyurethanklebstoffe bei Raumtemperatur; a: PU1; b: PU2

Analog zu den in Kurzzeitversuchen ermittelten Zugeigenschaften weist jeder untersuchte Polyurethan-Klebstofftyp ein spezifisches Kriechverhalten auf. Die Kriecheigenschaften eines Klebstoffs sind für die Fähigkeit, einer Klebverbindung Dauerlasten zu übertragen, von wesentlicher Bedeutung. Dauerbeanspruchungen, die bei einem Zugversuch an einem Klebstoff zu einer nicht abklingenden Spannungs-Dehnungs-Kurve mit anschließendem Probenbruch führen, erzeugen bei scher- oder normalkraftbeanspruchten Klebverbindungen ebenfalls ein Verbundversagen.

Die numerische Modellierung des Kriechverhaltens von Klebstoffen kann mit der Definition einer zeitabhängigen Steifigkeit erfolgen. Aufgrund der Belastungsabhängigkeit des Kriechverhaltens ist es für die Bestimmung eines geeigneten Materialmodells notwendig, Versuchsdaten eines Belastungsniveaus zu verwenden, die ungefähr dem Lastniveau innerhalb des numerisch zu analysierenden Bauteils entsprechen.

Für die numerische Beschreibung des Kriechverhaltens können Prony-Reihen verwendet werden, die eine zeitabhängige Formulierung des E-Moduls erlauben. Das entsprechende

Materialmodell wird als Vielparameter-Viskoelastizitätsmodell bezeichnet und ist in seiner mathematischen Beschreibung im Anhang unter Abschnitt A.1.2 dargestellt. Der Vergleich zwischen einer experimentell ermittelten Kriechkurve und einer mittels Vielparameter-Viskoelastizitätsmodell numerisch berechneten Kriechkurve ist in Abbildung 4.19 dargestellt. Auf der rechten Seite von Abbildung 4.19 wird die Verformung eines Zugstabs zum Zeitpunkt nach der vollständigen Lastaufbringung und nach einer Belastungsdauer $t = 2 \text{ h}$ gezeigt.

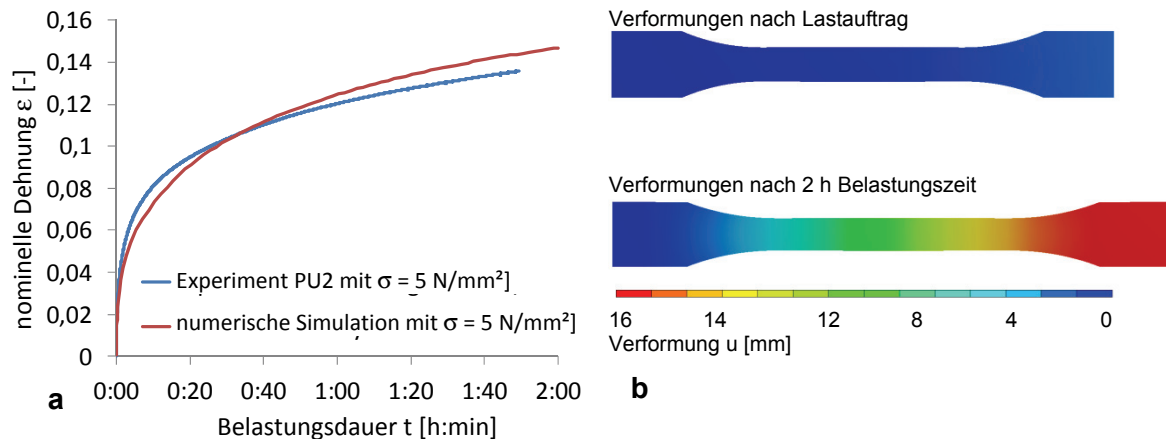


Abbildung 4.19: Vergleich zwischen experimentellen und mittels FEM ermittelten Daten unterschiedlicher Kriechversuche; a: Spannungs-Dehnungs-Diagramm; b: Verformung des Zugstabs direkt nach dem Lastauftrag und nach 48 h

Der Vergleich zwischen numerisch und experimentell ermittelten Daten zeigt, dass das verwendete Materialmodell prinzipiell geeignet ist, um die mechanische Reaktion des Klebstoffs infolge Kriechen bei einer definierten Beanspruchung beschreiben zu können.

4.1.4 Verbundbetrachtungen

Die Optimierung der Verbundeigenschaften zwischen Aluminium und der CFK-Lamelle hinsichtlich Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit stellt eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung eines leistungsfähigen Hybridelements dar. Die Verbundeigenschaften müssen unter Einbeziehung aller systemkritischer Zustände ganzheitlich analysiert werden. Dazu gehören:

- die Schubbeanspruchung infolge statischer Belastung,
- die Schubbeanspruchung infolge Temperaturdehnungsdifferenzen,
- die Analyse von Temperatureinflüssen und
- die Analyse von Dauerbeanspruchungen und Alterung.

Die Versuche werden untergliedert in:

- Kurzzeitversuche zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur und
- Langzeitversuche zur Ermittlung von Zeitstandfestigkeiten.

Eine für Klebverbindungen kritische Beanspruchungskombination stellt das Zusammenwirken von hohen Temperaturen und statischer Beanspruchung dar. Die Ermittlung der Schubtragfähigkeiten der Klebverbindung zwischen Aluminium und CFK erfolgt mittels zweier unterschiedlicher Versuchskonfigurationen:

- Zweischnittige Klebverbindung CFK – Aluminium – CFK ermöglichen die Untersuchung verschiedener Parameter.

- CFK-Lamellen-Auszugversuche aus einer Aluminiumkammer ermöglichen die Untersuchung von realitätsnahen Beanspruchungssituationen.

Der zweischnittige Schubversuch erlaubt die geometrie- und konstruktionsunabhängige Ermittlung der Schubtragfähigkeit der Klebverbindung. Zur Reduzierung von geometrischen Störquellen und Schälbeanspruchungen, die im gekammerten Hybridquerschnitt nicht auftreten können, wird auf Vorder- und Rückseite der Aluminiumbleche jeweils eine CFK-Lamelle aufgeklebt. Abbildung 4.20 zeigt einen Versuchskörper in der Draufsicht und modellhaft im Schnitt.

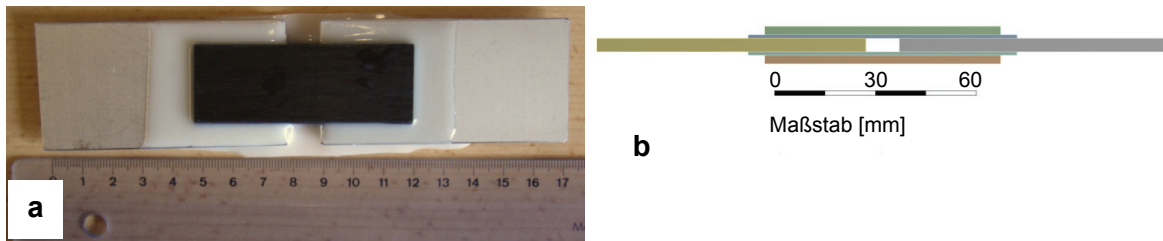


Abbildung 4.20: Schubprobe einer zweischnittigen Klebverbindung; a: Draufsicht auf den Probekörper; b: Schnitt (aufbereitete Geometrie eines FEM-Modells)

Auszugversuche von eingeklebten CFK-Lamellen aus Alu-Profilen ermöglichen die Ermittlung der Schubbeanspruchbarkeit der Klebverbindung innerhalb des Alu-CFK-Hybridprofils. Das Belastungsmodell ist damit, bezogen auf den praktischen Anwendungsfall, wesentlich realistischer als bei einem zweischnittigen Schubversuch. Abbildung 4.21 zeigt die Situation eines CFK-Lamellen-Auszugversuches aus einem Alu-CFK-Hybridprofil. Ein zusätzlich angebrachtes Extensometer ermöglicht die Bestimmung des Schubmoduls des Klebstoffs bzw. der Klebverbindung.

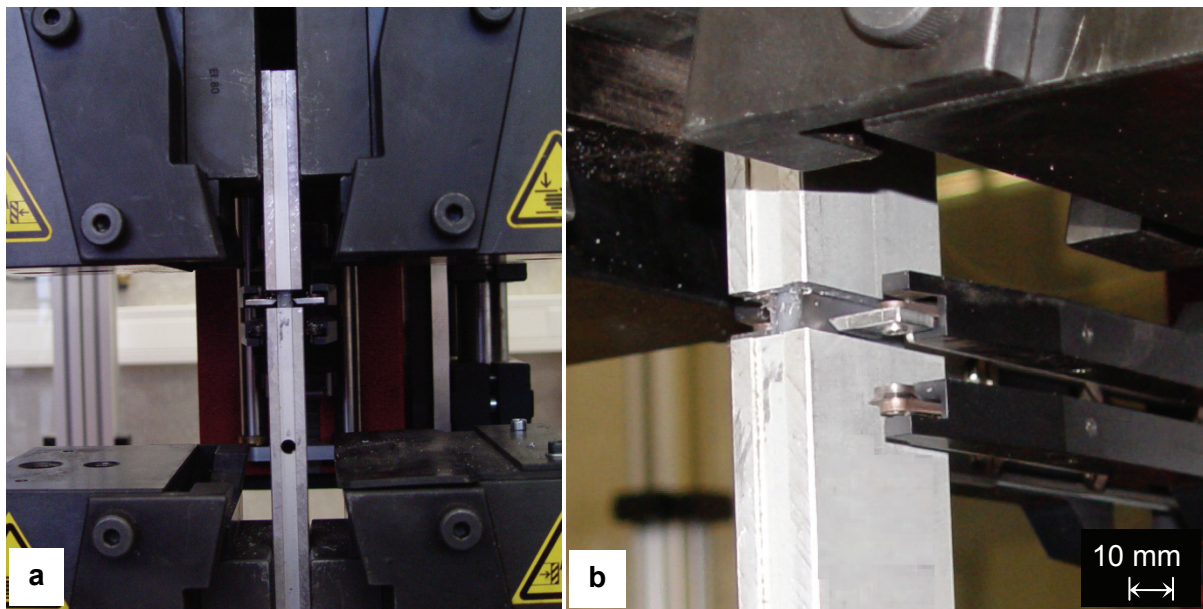


Abbildung 4.21: Auszugversuch einer CFK-Lamelle aus einem Aluminiumprofil; a: Versuchsaufbau; b: Messung der Relativverschiebung der CFK-Lamelle zum Aluminiumprofil mittels Extensometer

In den Untersuchungen werden unterschiedliche Parameter analysiert, die Systemrelevanz besitzen:

- die Art und Oberflächenqualität des Aluminiumwerkstoffs,
- der Klebstofftyp,
- die Prüftemperatur,
- das Belastungsniveau.

Exemplarisch wird die Analyse der Klebverbindung zwischen unterschiedlichen Aluminiumlegierungen und CFK-Lamellen diskutiert.

Zweischnittiger Schubversuch

Um eine Momentbeanspruchung in der Klebfuge zu vermeiden, wird eine zweischchnittige Probengeometrie, wie in Abbildung 4.20 dargestellt, gewählt.

Zur besseren Veranschaulichung der mechanischen Reaktion der Klebverbindung unter Schubbeanspruchung wird das experimentell ermittelte Last-Verformungsdiagramm in ein Schubspannungs-Verformungsdiagramm umgerechnet. Nichtlineare Beanspruchungsverläufe innerhalb der Klebfläche können dabei nicht berücksichtigt werden. Dennoch ermöglicht diese ingenieurmäßige Auswertung der Schubversuche objektive vergleichende Betrachtungen zwischen den unterschiedlichen Versuchskonfigurationen. Die Geometrie der Klebverbindung wird bei allen Versuchen unverändert belassen.

Der Einfluss der Temperatur auf die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung wird mittels einer Klimakammer unter definierten Temperaturbedingungen untersucht. Die Versuche werden im anwendungsrelevanten Temperaturbereich zwischen

$$-20\text{ °C} \leq \vartheta \leq +80\text{ °C}$$

durchgeführt.

Bei den Versagensbildern der Klebstoffverbindungen auf Abscheren können grundsätzlich drei unterschiedliche Versagensarten beobachtet werden:

- Im Temperaturbereich $\vartheta = -20\text{ °C}$ stellt sich ein Adhäsionsbruch in der CFK-Lamelle ein. Einzelne Kohlenstofffasern werden aus dem Kohlenstofffaser-Epoxidharzverbund abgescher, das Versagen erfolgt innerhalb der CFK-Lamelle (Abbildung 4.22).
- Bei Temperaturen um $0\text{ °C} \leq \vartheta \leq 20\text{ °C}$ stellt sich ein Kohäsionsbruch im Klebstoff ein (Abbildung 4.23).
- Bei Temperaturen von $\vartheta \geq 40\text{ °C}$ ist ein Adhäsionsbruch in der Klebfuge zwischen dem Klebstoff und der Aluminiumoberfläche zu beobachten (Abbildung 4.24).

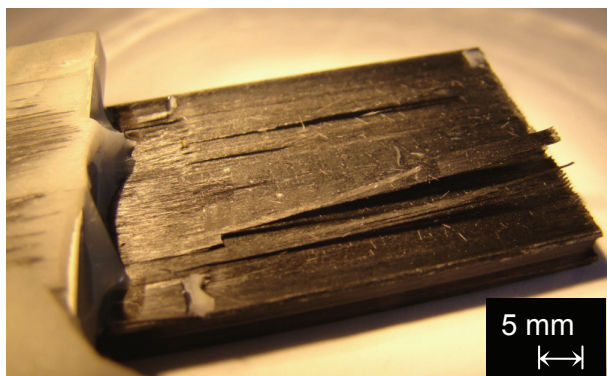


Abbildung 4.22: Bruchbild einer Schubprobe bei einer Prüftemperatur von $\vartheta = -20\text{ °C}$, Adhäsionsbruch innerhalb der CFK-Lamelle

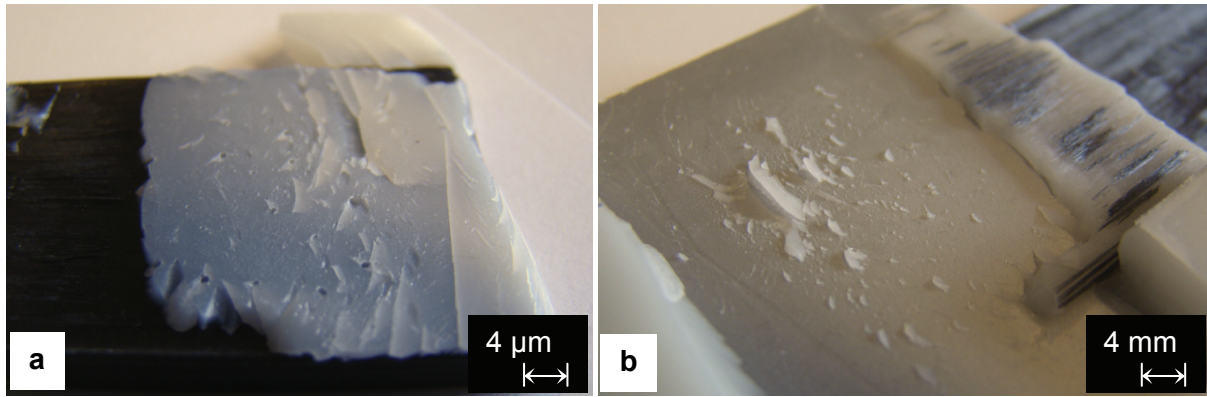


Abbildung 4.23: Bruchbild einer Schubprobe bei einer Prüftemperatur von $\nu = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Kohäsionsbruch innerhalb des Klebstoffes; a: Bruch auf der Klebstoff- bzw. CFK-Lamellenseite; b: Aluminiumseite



Abbildung 4.24: Bruchbild einer Schubprobe bei einer Prüftemperatur von $\nu = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Aluminium

Abbildung 4.25 zeigt eine Zusammenstellung der Schubfestigkeitsuntersuchungen. Im Temperaturbereich von $\nu = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt die Schubfestigkeit der Klebverbindung $\tau \approx 10 \text{ N/mm}^2$ und an der oberen Temperaturgrenze von $\nu = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ etwa $\tau \approx 2,5 \text{ N/mm}^2$.

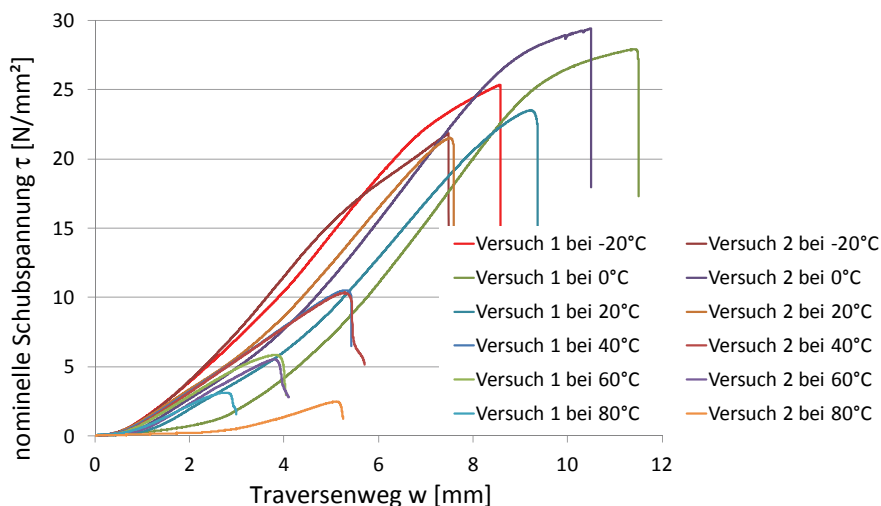


Abbildung 4.25: Schubtragfähigkeit - Kurzzeitversuche PU2 mit EN AW-6061 T6; Prüftemperatur von $\nu = -20 \dots +80 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Die Schubfestigkeiten der Klebverbindung zwischen Aluminium und CFK werden im Wesentlichen durch die Adhäsionseigenschaften der Aluminiumoberfläche bestimmt. Unterschiedliche Aluminiumwerkstoffe weisen z. T. stark voneinander abweichende Adhäsionseigen-

schaften auf, die zusätzlich durch verschiedenartige Oberflächenbehandlungen beeinflusst werden können.

Numerische Analyse

Die numerische Analyse der Klebverbindung wird mit verschiedenartigen Modellvarianten realisiert. Kurzzeitige Belastungsuntersuchungen werden mit elastischen Materialmodellen numerisch modelliert. Dabei werden temperaturabhängige Steifigkeiten für den Klebstoff angesetzt. In Verbindung mit der Beschreibung des thermischen Temperaturdehnungskoeffizienten ist damit eine grundlegende Analyse der mechanischen Vorgänge innerhalb der Klebverbindung unter verschiedenen Beanspruchungszuständen möglich.

Tabelle 4-3 zeigt die in den numerischen Simulationen angesetzten Werte für die statisch-mechanische Modellierung der Klebstoffe PU1 und PU2.

Temperatur ϑ [°C]	E_{PU1} [N/mm ²]	G_{PU1} [N/mm ²]	E_{PU2} [N/mm ²]	G_{PU2} [N/mm ²]	μ_{PU1}, μ_{PU2} [-]	$\alpha_{T,PU1}, \alpha_{T,PU2}$ [1/K]
-20	50	17,61	500	176,05	0,42	$2,3 \times 10^{-4}$
0	30	10,56	450	158,45		
+20	20	7,04	120	42,25		
+40	19	6,69	45	15,54		
+60	18	6,34	25	8,80		
+80	15	5,28	20	7,04		

Tabelle 4-3: Materialkennwerte für die numerische Betrachtung der Klebstoffe PU1 und PU2

Für die mechanischen Eigenschaften der CFK-Lamelle wird die Annahme eines idealisiert orthotrop-elastischem Materialverhaltens getroffen. Der Aluminiumwerkstoff wird idealisiert mit einem bilinear-elastisch-plastischem Materialmodell betrachtet. Wesentliche Materialkennwerte sind:

- Aluminium:
 - $E_1 = 70.000 \text{ N/mm}^2$; $\mu = 0,33$; $f_y = 250 \text{ N/mm}^2$; $E_2 = 500 \text{ N/mm}^2$;
 $\alpha_T = 23 \times 10^{-6}/\text{K}$,
- CFK-Lamelle:
 - $E_{||} = 160.000 \text{ N/mm}^2$; $E_{\perp} = 10.000 \text{ N/mm}^2$,
 - $G_{||} = 5.400 \text{ N/mm}^2$; $G_{\perp} = 5.800 \text{ N/mm}^2$,
 - $\mu_{||} = 0,12$; $\mu_{\perp} = 0,3$
 - $\alpha_{T||} = 0,2 \times 10^{-6}/\text{K}$; $\alpha_{T\perp} = 30 \times 10^{-6}/\text{K}$,

Das Kriechverhalten in der Klebverbindung kann numerisch für verschiedenartige mechanische Beanspruchungszustände analysiert werden. Dazu wird die aus dem Zugversuch numerisch bestimmte viskose Materialbeschreibung für den Klebstoff verwendet.

Im Ergebnis der numerischen Analyse der Schubspannungsverteilung einer scherbeanspruchten Dickschichtklebung ist festzustellen, dass speziell in den Endbereichen der Verbindung Schubspannungen auftreten, die weit oberhalb der ingenieurmäßig berechneten Schubspannungen liegen. Dieser Effekt verstärkt sich bei einer Überlagerung der mechanischen Beanspruchung mit Temperaturdehnungseffekten speziell bei niedrigen Temperaturen. Die Auswertung unterschiedlicher numerischer Berechnungen des Schubspannungsverlaufes in der Klebfuge ist in Abbildung 4.26 dargestellt.

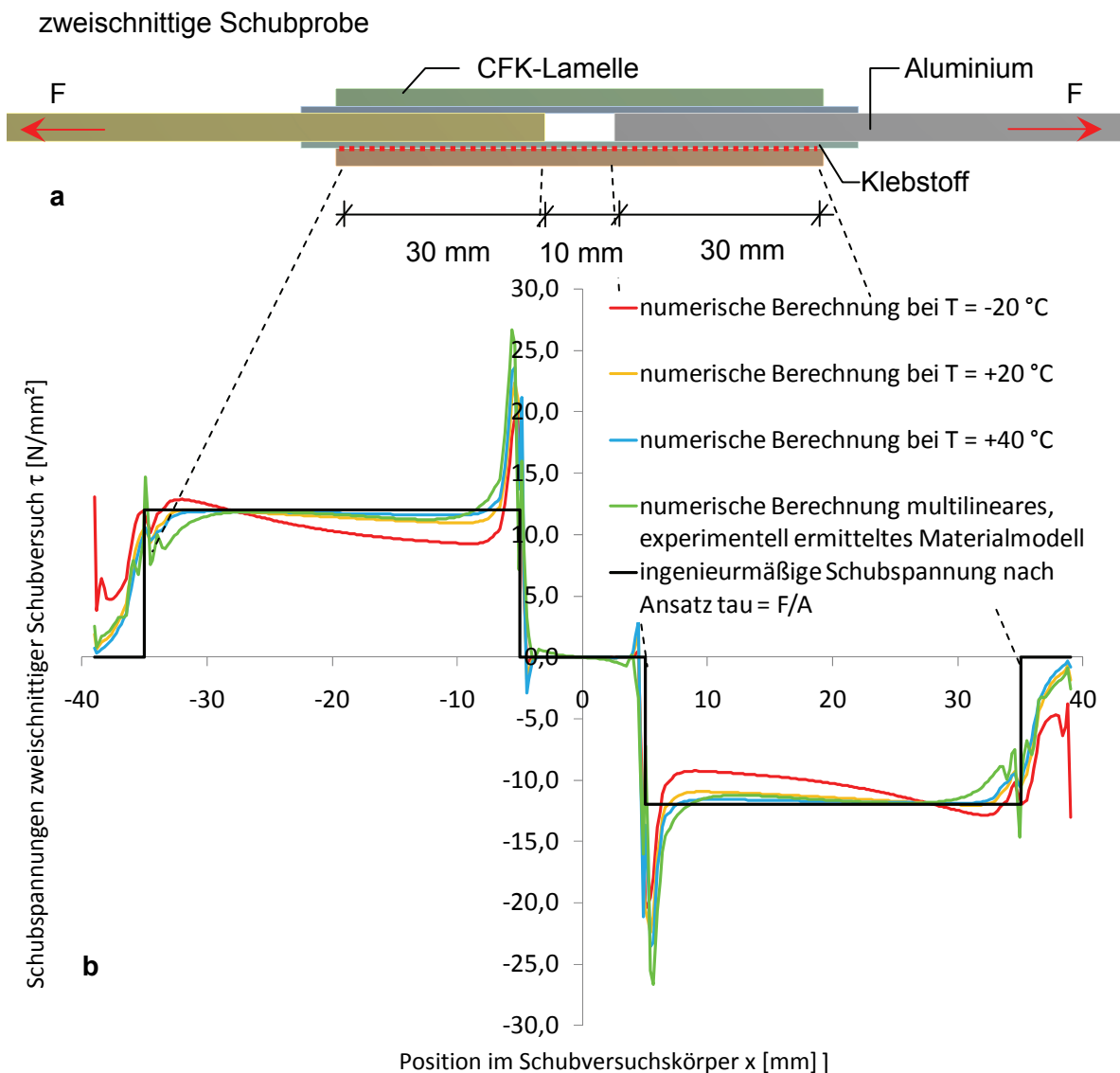


Abbildung 4.26: Modellierung von einer Klebverbindung unter mechanischer Beanspruchung bei $\tau_{\text{mittel}} = 12,0 \text{ N/mm}^2$; Vergleich: numerisches Modell – Ingenieurmodell; Temperatureinfluss \Rightarrow rot: $\nu = -20 \text{ °C}$; orange: $\nu = +20 \text{ °C}$; blau: $\nu = +40 \text{ °C}$; a: Geometriemodell und Lage der betrachteten Klebfuge
b: Schubspannung aufgetragen über die Klebfugenlänge

Auszugversuche

Zur Ermittlung anwendungsbezogener Kenngrößen der Klebverbindung werden gekammert eingebundene CFK-Lamellen aus Aluminiumprofilen, wie in Abbildung 4.27 dargestellt, herausgezogen. Die Einbindetiefe der CFK-Lamelle entspricht damit der Länge der Klebverbindung.

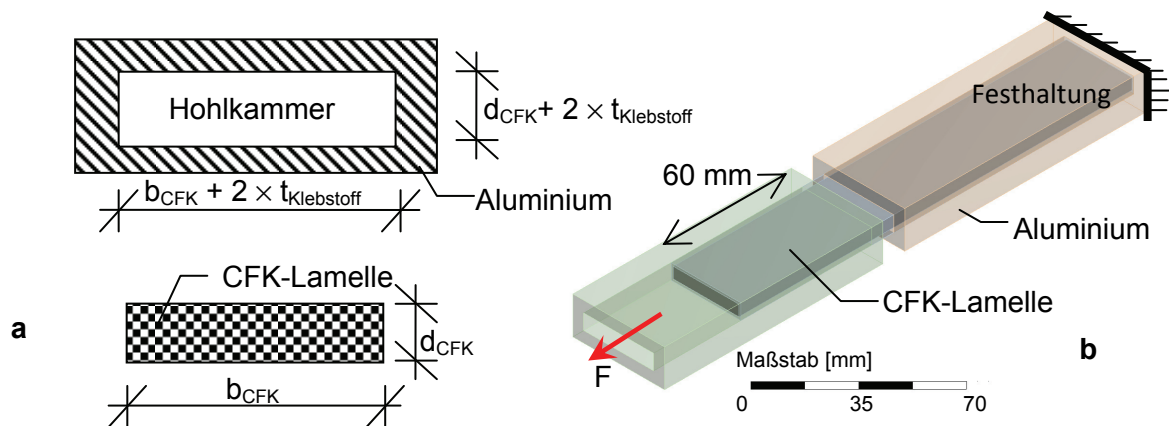


Abbildung 4.27: Versuchskonfiguration für Auszugsversuche an gekammerten Querschnitten; a: Aluminium- und CFK-Querschnitt; b: Form der Auszugprobe im numerischen Modell

Während des Versuches wird die Relativverschiebung der CFK-Lamelle gegenüber dem Aluminiumprofil mittels eines Extensometers gemessen. Die Auswertung des Auszugsversuches ergibt ein Kraft-Weg-Diagramm, das über die Klebfläche in ein nominelles Schubspannungs-Weg-Diagramm umgerechnet werden kann.

Um eine Vergleichbarkeit der Versuche untereinander zu gewährleisten, wird die Einbindetiefe der CFK-Lamellen auf $L = 60$ mm festgelegt. Versuche mit $L > 60$ mm lassen keine sinnvolle Zuordnung gemittelter nomineller Spannungen zu, da sehr hohe Spannungsspitzen in den Endbereichen der Verbindung auftreten. Dies ist auch von der Auslegung schubkraftbeanspruchter Schraubenreihen oder langen Schweißnähten bekannt und lässt sich numerisch darstellen.

Kennwerte der Klebverbindung:

- Klebstoff: PU2,
- Aluminium: zwei unterschiedliche Legierungstypen zu Vergleichszwecken,
- einheitliche CFK-Lamelle mit rechtwinkligem Querschnitt
- Einbindetiefe der CFK-Lamelle: $L = 60$ mm,
- Klebfläche der Auszugprobe: $A_{Klebstoff} = \text{Einbindetiefe} \times \text{CFK-Lamellenumfang}$,
- Aushärtedauer Klebstoff $t = 4$ Wochen.

Die Auswertungen der nominellen Schubspannungs-Verschiebungsverläufe sind für zwei unterschiedliche Aluminiumwerkstoffe in Abbildung 4.28 dargestellt.

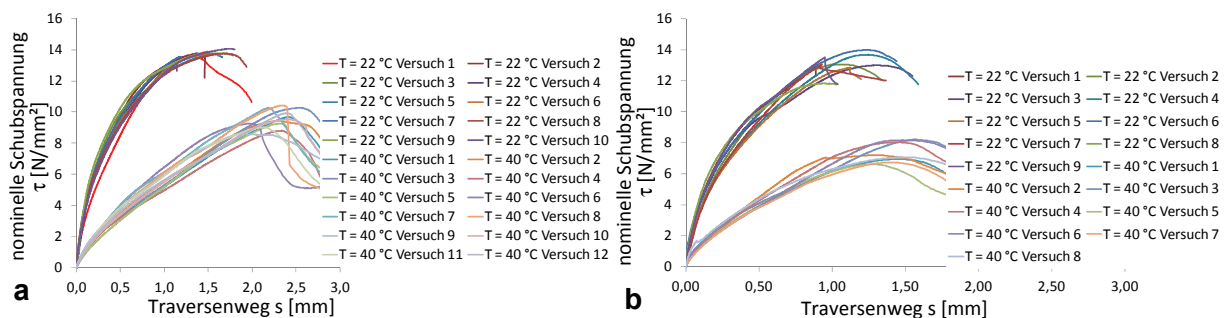


Abbildung 4.28: Tragfähigkeit Klebverbindung - Prüftemperatur von $v = 22$ °C und $v = 40$ °C Klebstoff: PU2; a: Aluminium EN AW-6005 A T6; b: EN AW-6061 T6

Die hier gemessenen Schubfestigkeiten stehen im Wesentlichen in guter Übereinstimmung mit den aus den zweischnittigen Schubversuchen ermittelten Werten, die in Abbildung 4.25 dargestellt sind.

Numerische Analyse

Um einen detaillierten Einblick in die mechanischen Vorgänge während des Auszugsversuches zu bekommen, wird der Auszugsversuch mittels unterschiedlicher FEM-Modelle analysiert. Die dafür verwendeten Materialkennwerte resultieren aus den Versuchen an den Ausgangswerkstoffen, Aluminium, CFK-Lamelle und Klebstoff, die in Abschnitt 4.1.3 aufgeführt sind. Abbildung 4.29 zeigt Ergebnisse der numerischen Betrachtung eines CFK-Lamellen-Auszugsversuches mit einer CFK-Lamellen-Einbindetiefe von $L = 200$ mm. Die aufgebrachte Zugbelastung der CFK-Lamelle ist so gewählt, dass eine rechnerische nominelle Schubspannung in der Klebfuge von $\tau_{\text{nominell}} = 10,0$ N/mm² entsteht. Bei der Berechnung wird die Symmetrie des Versuchsquerschnitts genutzt, um Rechenzeit zu sparen.

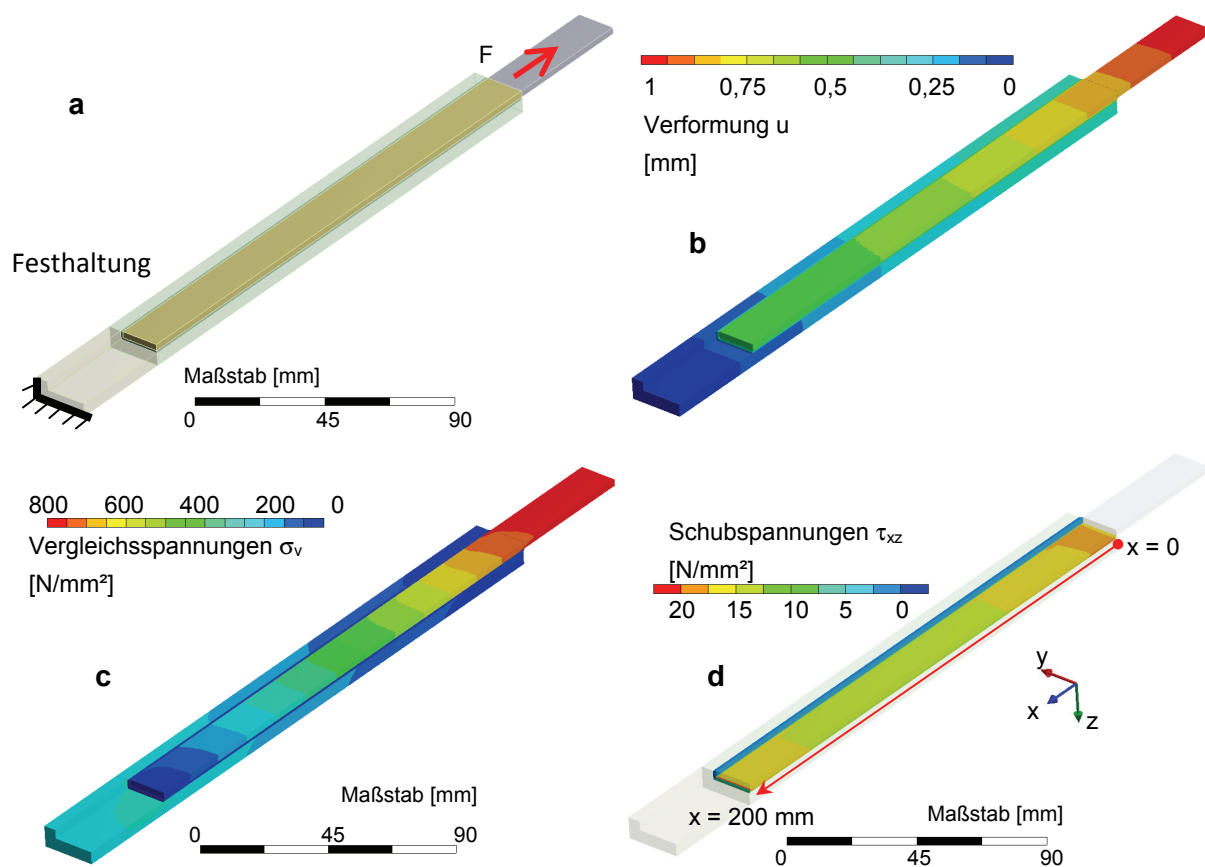


Abbildung 4.29: Ergebnisse der FEM-Analyse eines CFK-Lamellen-Auszugsversuches; a: geometrisches Modell; b: Verformungen infolge Zugbeanspruchung der CFK-Lamelle; c: Vergleichsspannungen innerhalb des Alu-Klebstoff-CFK-Systems; d: Schubspannungen im Klebstoff mit Darstellung der Einbindetiefe

Unterschiedliche Berechnungen mit verschiedenen Einbindetiefen zeigen, dass sich die Spannungsspitzen in den Endbereichen der Klebung mit kürzeren Einbindetiefen reduzieren. Die numerisch ermittelte Schubspannungsverteilung für unterschiedliche Einbindetiefen der CFK-Lamelle bei gleicher nomineller Schubspannung ist in Abbildung 4.30 dargestellt. Die

Position der Einbindetiefe $x = 0$ entspricht der Austrittsöffnung der CFK-Lamelle aus dem Aluminiumprofil (siehe Abbildung 4.29d).

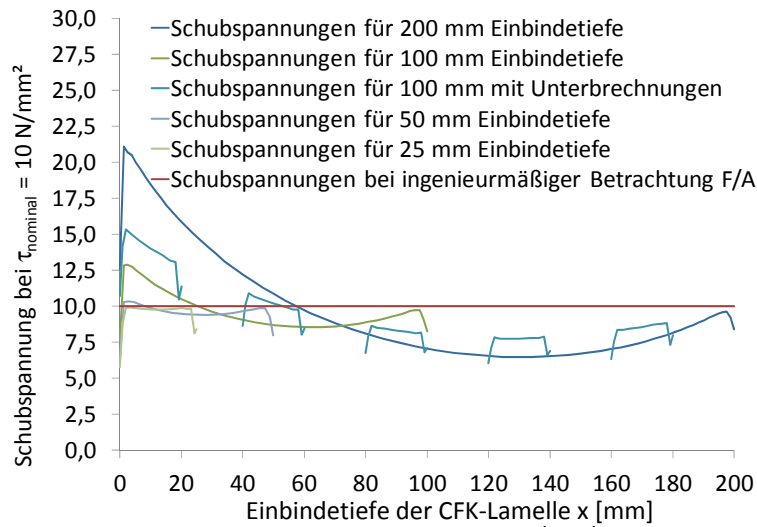


Abbildung 4.30: Numerisch ermittelte Schubspannung in Abhängigkeit der Prüfkörperlänge bei gleicher nomineller Schubbeanspruchung

Die Verteilung der Schubspannung, die sich infolge einer extern aufgetragenen Zugbeanspruchung auf die CFK-Lamelle ausbildet, ist ausgeprägt nichtlinear. In der FE-Analyse eines Auszugversuches einer CFK-Lamellen-Einbindetiefe von $L = 200 \text{ mm}$ kann gezeigt werden, dass die Schubspannung in den Endbereichen der Klebverbindung etwa der doppelten Beanspruchung entspricht, die bei einer ingenieurmäßigen Betrachtung angenommen wäre. In den Endbereichen der Verbindung entstehen Spannungsspitzen, die dazu führen, dass experimentell durchgeführte Auszugversuche mit umgerechneten nominellen Schubspannungen Beanspruchbarkeiten ausweisen, die stark auf der sicheren Seite liegen. Das gilt insbesondere für Probekörper, die eine CFK-Lamellen-Einbindetiefe von $L > 100 \text{ mm}$ aufweisen. Probekörpergeometrien, die eine Einbindetiefe von $L \approx 50 \text{ mm}$ aufweisen, sind zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit der Klebverbindung besser geeignet, da die numerisch berechnete Schubspannung weniger von der nominellen Schubspannung abweicht.

Zeitstandfestigkeiten

Zur Untersuchung des Kriechverhaltens der Klebverbindung werden Auszugproben, wie in Abbildung 4.27 dargestellt, kraftgesteuert belastet. Höhe und Dauer der Belastung werden in unterschiedlichen Versuchen variiert. Um eine vollständige Aushärtung des Klebstoffs zu ermöglichen, betrug die Aushärtedauer vor Versuchsbeginn $t = 14 \text{ d}$.

Beanspruchungsparameter:

- Schubbeanspruchung $\tau_{\text{nominell}} = 3,2 \text{ N/mm}^2$ für $t = 48 \text{ h}$,
- Schubbeanspruchung $\tau_{\text{nominell}} = 2,4 \text{ N/mm}^2$ für $t = 48 \text{ h}$,
- Schubbeanspruchung $\tau_{\text{nominell}} = 2,0 \text{ N/mm}^2$ für $t = 48 \text{ h}$,
- Umgebungstemperatur während der Versuchsdurchführung $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

In Abbildung 4.31 ist die Verschiebung der CFK-Lamelle im Hybridprofil über die Zeit angegeben.

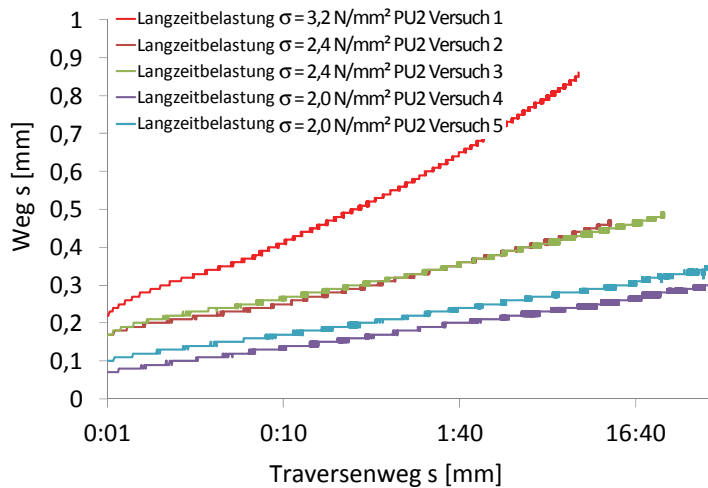


Abbildung 4.31: Belastungs- und zeitabhängige Reaktion der Klebfuge während des Auszugversuches; Klebstoff: PU2; Prüftemperatur $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Bei den Versuchen 1 bis 3 erfolgte während des Belastungsversuches ein Schubversagen der Klebverbindung. Die Kriechvorgänge innerhalb des Klebstoffs verlangsamten sich während der Belastungsdauer, kommen dabei jedoch nicht zum Stillstand. Die geringeren Lastniveaus der Versuche 4 und 5 führen zu einem weitgehenden Abklingen der Kriechvorgänge innerhalb des Klebstoffs bei langen Belastungsdauern. Nach einer Belastungsdauer von $t = 48\text{ h}$ werden die Proben entlastet und nach einer Relaxationszeit von $t = 4\text{ h}$ auf ihre Restschubtragfähigkeit überprüft. Im Ergebnis dieser Untersuchung ist keine Schädigung der Klebverbindung, d. h. Reduzierung der Grenztragfähigkeit, durch die Zeitstandbelastung nachweisbar.

Numerische Analyse

Die mechanische Reaktion der Klebfuge infolge einer andauernden Schubbeanspruchung kann im Zusammenhang mit den durchgeführten Kriechversuchen an Klebstoffproben betrachtet werden. Es ist zu beachten, dass die Schubspannung über die Klebfugenlänge, wie in Abbildung 4.30 dargestellt, zu Belastungsbeginn unterschiedlich verteilt vorliegt. Diese ungleichmäßige Verteilung der Schubspannung innerhalb der Klebfuge verändert sich während der Belastungsdauer. Mittels numerischer Untersuchungen kann das verdeutlicht werden. Das an den Zeitstandversuchen an Zugstäben aus Klebstoff kalibrierte Materialmodell wird hier verwendet, um die mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs während des Auszugversuches zu beschreiben.

Analog zu den experimentellen Untersuchungen besteht auch in der numerischen Analyse ein direkter Zusammenhang zwischen der Belastungshöhe und der Entwicklung der Kriechvorgänge im Klebstoff. Ergebnisse einer numerischen Analyse der Dauerbelastung mit einer Schubbeanspruchung von $\tau_{\text{nominell}} = 2\text{ N/mm}^2$ sind in Abbildung 4.32 dargestellt. Das geometrische Modell sowie die Rand- und Symmetriebedingungen entsprechen der in Abbildung 4.29a dargestellten Situation.

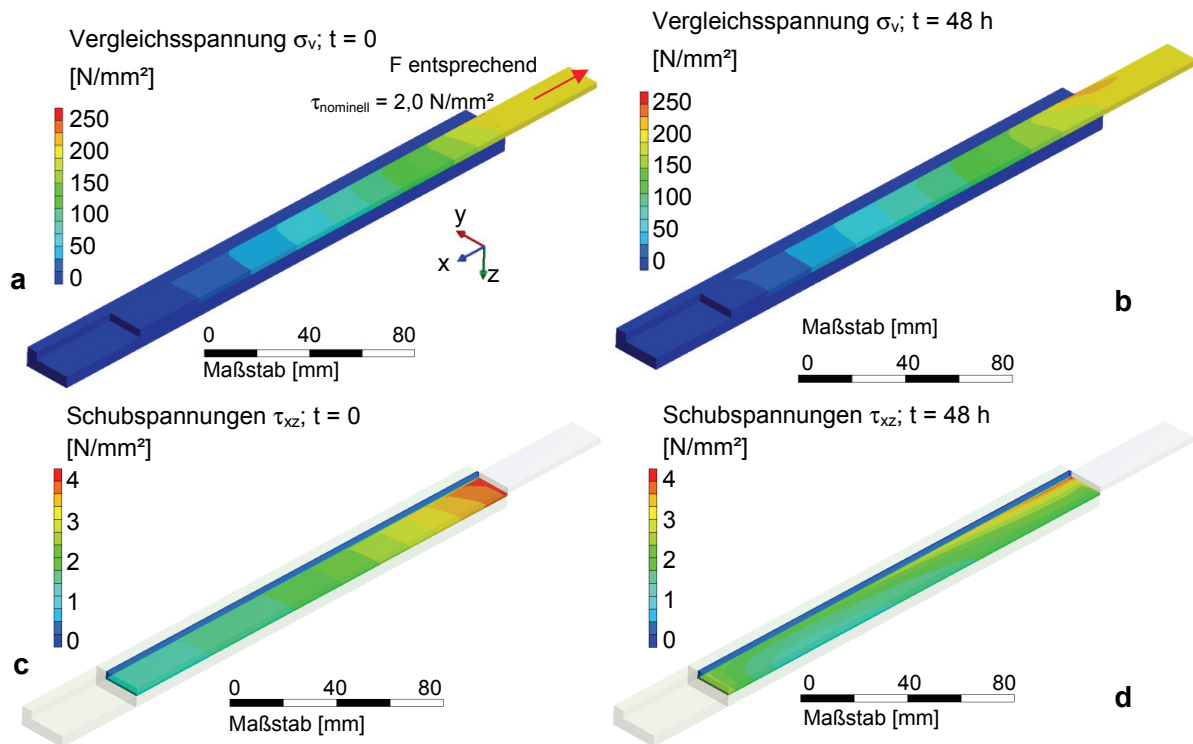


Abbildung 4.32: Ergebnisse der FEM-Analyse des Dauerbelastungs-Auszugversuches mit $\tau_{\text{nominell}} = 2,0 \text{ N/mm}^2$; a: Vergleichsspannungen unmittelbar nach Lastaufbringung; b: Vergleichsspannungen $t = 48 \text{ h}$ nach Lastaufbringung; c: Schubspannungen im Klebstoff unmittelbar nach Lastaufbringung; d: Schubspannungen im Klebstoff $t = 48 \text{ h}$ nach Lastaufbringung

Die Verteilung der Schubspannung über die Klebfugenlänge ändert sich mit fortschreitender Belastungsdauer. Die anfänglich stark ungleichförmige Verteilung nähert sich bei langer Belastungsdauer immer weiter der ingenieurmäßig berechneten, konstanten Schubspannungsverteilung an.

Bei hohen Schubbeanspruchungen ist während der gesamten Beanspruchungsdauer ein stetiges Kriechen innerhalb der Klebfuge zu beobachten. Das führt bei langen Beanspruchungsdauern zu hohen Beanspruchungen im Endbereich der Klebverbindung. Ergebnisse der numerischen Analyse eines Langzeitbelastungsversuches mit hohen Schubbeanspruchungen von $\tau_{\text{nominell}} = 3,2 \text{ N/mm}^2$ sind in Abbildung 4.33 dargestellt. Die Schubbeanspruchung im Endbereich der Klebverbindung wächst mit fortschreitender Beanspruchungsdauer so weit an, das die Berechnung für $t > 3,5 \text{ h}$ kein numerisches Gleichgewicht mehr finden kann.

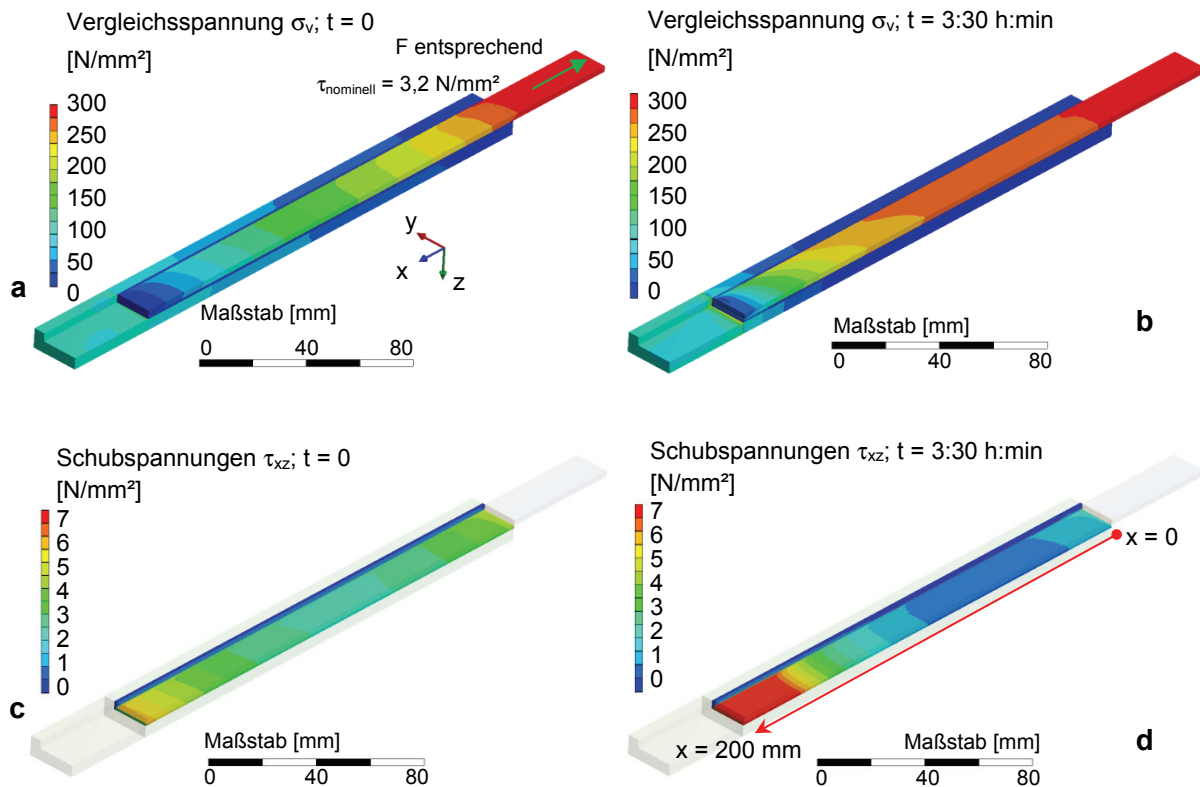


Abbildung 4.33: Ergebnisse der FEM-Analyse des Dauerbelastungs-Auszugversuches mit $\tau_{\text{nominell}} = 3,2 \text{ N/mm}^2$; a: Vergleichsspannungen unmittelbar nach Lastaufbringung; b: Vergleichsspannungen $t = 3,5 \text{ h}$ nach Lastaufbringung; c: Schubspannungen im Klebstoff unmittelbar nach Lastaufbringung; d: Schubspannungen im Klebstoff $t = 3,5 \text{ h}$ nach Lastaufbringung

In experimentellen Untersuchungen trat ein Versagen der Klebverbindung bei $t > 8 \text{ h}$ auf. Analog zu den numerischen Untersuchungen konnte hier ebenfalls kein Abklingen der Kriechverformungen während der Belastungsdauer festgestellt werden. Ein Vergleich zwischen experimentell und numerisch ermittelten zeitabhängigen Verschiebungen der Klebfuge unter Belastung erfolgt in Abbildung 4.34.

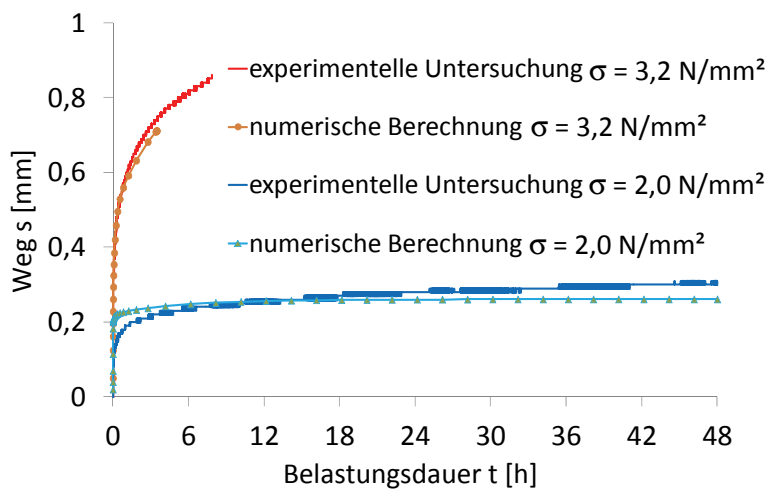


Abbildung 4.34: Vergleich zwischen experimentellen und mittels FEM ermittelten Kriechverformungen innerhalb der Klebverbindung bei unterschiedlichen Lastniveaus

Die über die Klebfugenlänge aufgetragene Schubspannung ist für unterschiedliche Belastungshöhen und verschiedene Zeitpunkte in Abbildung 4.35 dargestellt. Der betrachtete Pfad innerhalb der Klebfuge ist in Abbildung 4.33d dargestellt.

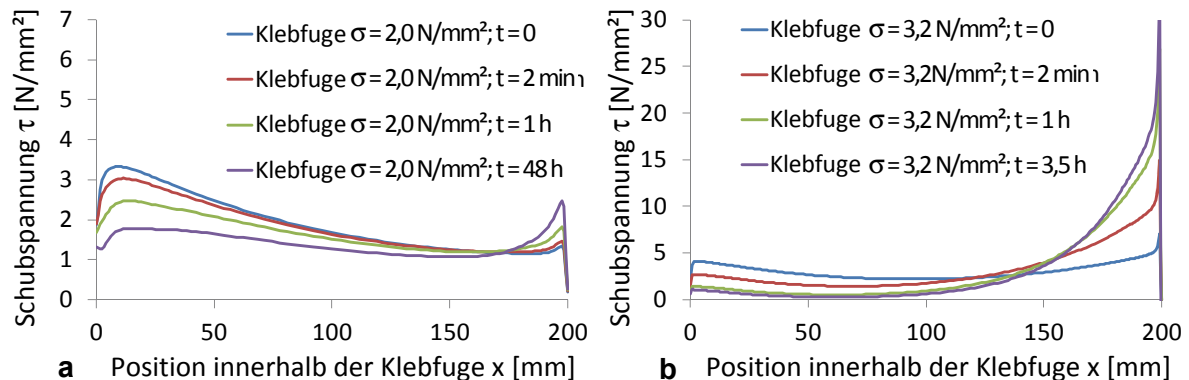


Abbildung 4.35: a: berechnete Schubspannungsverteilung Klebfuge bei $\tau_{\text{nominell}} = 2,0 \text{ N/mm}^2$
b: berechnete Schubspannungsverteilung Klebfuge bei $\tau_{\text{nominell}} = 3,2 \text{ N/mm}^2$

Nach Entlastung bildet sich ein Teil der Verschiebung innerhalb der Klebfuge zurück. Eine vollständige Rückbildung der Verformung erfolgt nicht, da viskoplastische Effekte zu permanenten Verformungen führen. Die Höhe der bleibenden Verformung hängt dabei von Größe und Dauer der eingetragenen Belastung ab. Für die Bemessung dieser Hybridprofile bedeutet das eine Einschränkung hinsichtlich zulässiger Dauerbeanspruchungen, die auf die Klebverbindung einwirken dürfen.

Temperaturwechselbeanspruchungen / Alterungseffekte

Temperaturwechselbeanspruchungen führen zu Dehnungsdifferenzen zwischen der CFK-Lamelle und dem Aluminium. Die daraus im Hybridprofil entstehenden internen Verschiebungen müssen durch eine elastisch wirkende Klebverbindung ausgeglichen werden.

In Klimauntersuchungen werden Auswirkungen von Temperaturwechseln auf die strukturelle Klebverbindung untersucht. Ziel der Untersuchung ist eine ganzheitliche Betrachtung der klimatischen Beanspruchung, die auf einen Alu-CFK-Hybridträger, im speziellen auf die Klebverbindung, einwirken kann. Dazu werden experimentell klimatische Untersuchungen an Alu-CFK-Hybridträgern mit geschlossenem Kastenquerschnitt durchgeführt.

Die Hybridprofile werden in einer Klimakammer mit zyklischen Temperaturwechseln beansprucht. Die Klimawechselbeanspruchung erfolgt mit den Parametern:

- Alu-CFK-Hybridquerschnitt nach Abbildung 4.36,
- Länge der Hybridträger $L = 1.000 \text{ mm}$,
- 300 Temperaturwechsel in einer Klimakammer,
- Temperaturwechselbereich: $-25^\circ\text{C} \Rightarrow 80^\circ\text{C} \Rightarrow -25^\circ\text{C}$ Lastperiode $t = 4 \text{ h}$,
- relative Luftfeuchtigkeit konstant $\rho = 30 \text{ \%}$.

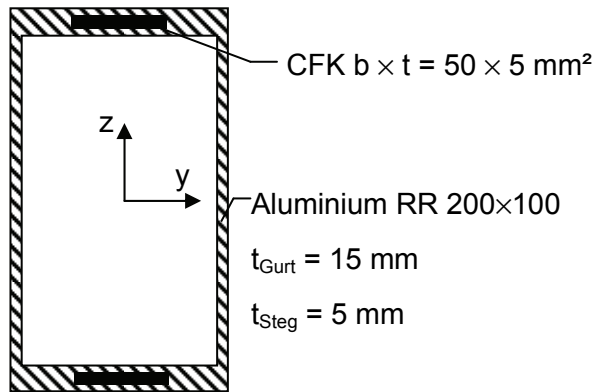


Abbildung 4.36: Alu-CFK-Hybridquerschnitt RR 200x100 mm²

Die Auswirkungen der Temperaturwechselbeanspruchung auf die Klebverbindung lassen sich durch experimentelle Untersuchungen beurteilen, bei denen Schubtragfähigkeiten relativ zu den Tragfähigkeiten unbeanspruchter Klebverbindung ermittelt werden. Ein Vergleich der Versuchsergebnisse untereinander ermöglicht dabei die Detektion möglicher Schädigungen infolge der klimatischen Einwirkung.

Numerische Analyse

Die numerische Betrachtung von mechanischen Vorgängen innerhalb eines Alu-CFK-Hybridelementes bei Temperaturwechselbeanspruchung erlaubt eine Darstellung lokaler Beanspruchungen im Aluminium und der CFK-Lamelle sowie im Bereich der Klebverbindung zwischen Aluminium und CFK.

Wesentliche Eingangsparameter für die numerische Betrachtung sind:

- Länge $L = 500 \dots 1.000 \dots 2.000$ mm,
- Querschnitt nach Abbildung 4.36,
- CFK-Lamelle, orthotrop, $b \times t = 30 \times 5$ mm²; $E_{II} = 160.000$ N/mm² $\alpha_{TII} = 0,2 \times 10^{-6}/K$,
- Aluminium isotrop elastisch $\mu = 0,34$ $E = 70.000$ N/mm² $\alpha_T = 23,8 \times 10^{-6}/K$,
- Klebstoff PU2 isotrop elastisch mit $\mu = 0,42$ $\alpha_T = 230 \times 10^{-6}/K$
temperaturabhängige Steifigkeit nach Tabelle 4-3,
- Temperaturwechsel von $v_0 = 20$ °C auf $v_1 = -20$ °C und $v_2 = 80$ °C.

Die mittels FEM ermittelte Schubspannung in der Klebfuge weist speziell in den Endbereichen der Hybridträger eine Spitzenbeanspruchung auf. Die Höhe der maximal auftretenden Schubspannung ist dabei bis zu einer Hybridträgerlänge von $L \approx 1.000$ mm abhängig von der Verbundfugenlänge. Die Auswertung einer numerischen Analyse eines Alu-CFK-Hybridelementes mit $L = 1.000$ mm bei einer Temperaturwechselbeanspruchung $v_0 = 20$ °C auf $v_1 = -20$ °C ist in Abbildung 4.37 dargestellt.

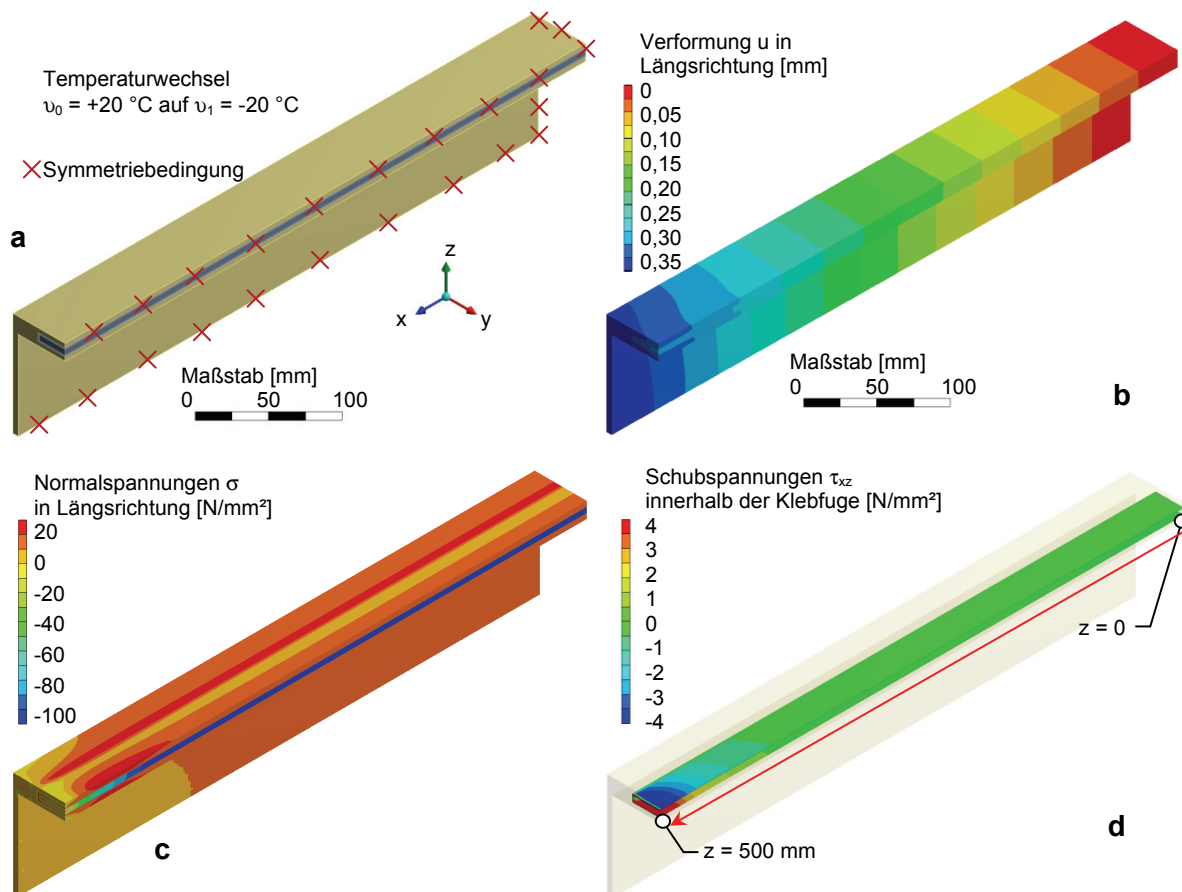


Abbildung 4.37: Ergebnisse der FEM-Analyse eines temperaturwechselbeanspruchten Alu-CFK-Hybridelementes $\rightarrow v_0 = +20\text{ °C}$ auf $v_1 = -20\text{ °C}$; a: geometrisches Modell mit Randbedingungen; b: Verschiebungen [mm] in Trägerlängsrichtung; c: Normalspannungen [N/mm²] in Trägerlängsrichtung; d: Schubbeanspruchungen in der Klebfuge [N/mm²]

Abbildung 4.38 zeigt den Schubspannungsverlauf in der Klebfuge Aluminium – CFK-Lamelle für unterschiedliche Trägerlängen und Temperaturlasten. Eine wesentliche Kenngröße, die aus der numerischen Betrachtung herausgeht, ist die maximale Schubspannung in der Klebfuge. In den numerischen Analysen kann festgestellt werden, dass die maximal auftretende Schubspannung in der Klebfuge ab einer Trägerlänge von $L \geq 500\text{ mm}$ nahezu konstant ist. Daraus folgt, dass experimentelle Untersuchungen zur Klimawechselbeanspruchung mit Hybridelementen, die eine Mindestlänge von $L \geq 500\text{ mm}$ aufweisen, Aussagen zur Temperaturwechselbeständigkeit der Klebverbindung eines solchen Hybridelementes ermöglichen.

Die Entwicklung der Normalspannung im Aluminium und in der CFK-Lamelle ist in Verbindung mit den Schubspannungen, die in der Klebfuge auftreten, zu betrachten. Die Normalspannungen, die durch Temperaturlasten in den Hybridträger induziert werden, müssen integriert über die Hybridquerschnittsfläche Null ergeben. Die maximale Höhe der Normalspannung ist dabei ebenfalls von der Hybridelementlänge und der aufgetragenen Temperaturlast abhängig.

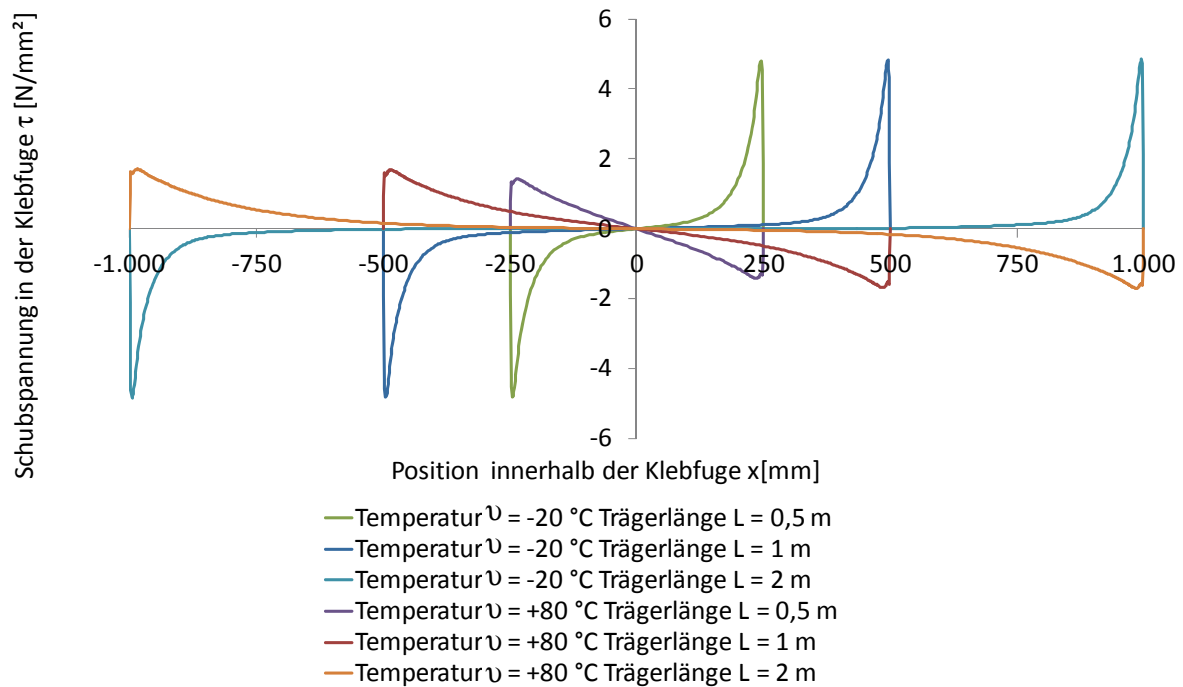


Abbildung 4.38: Ergebnisse der FEM-Analyse von Schubspannung in der Klebfuge Alu–CFK bei unterschiedlichen Temperaturlasten und Hybridelementlängen

Die durch den Temperaturwechsel erzeugten Normalspannungen im Gurtbereich des Hybridelementes sind in Abbildung 4.39 dargestellt.

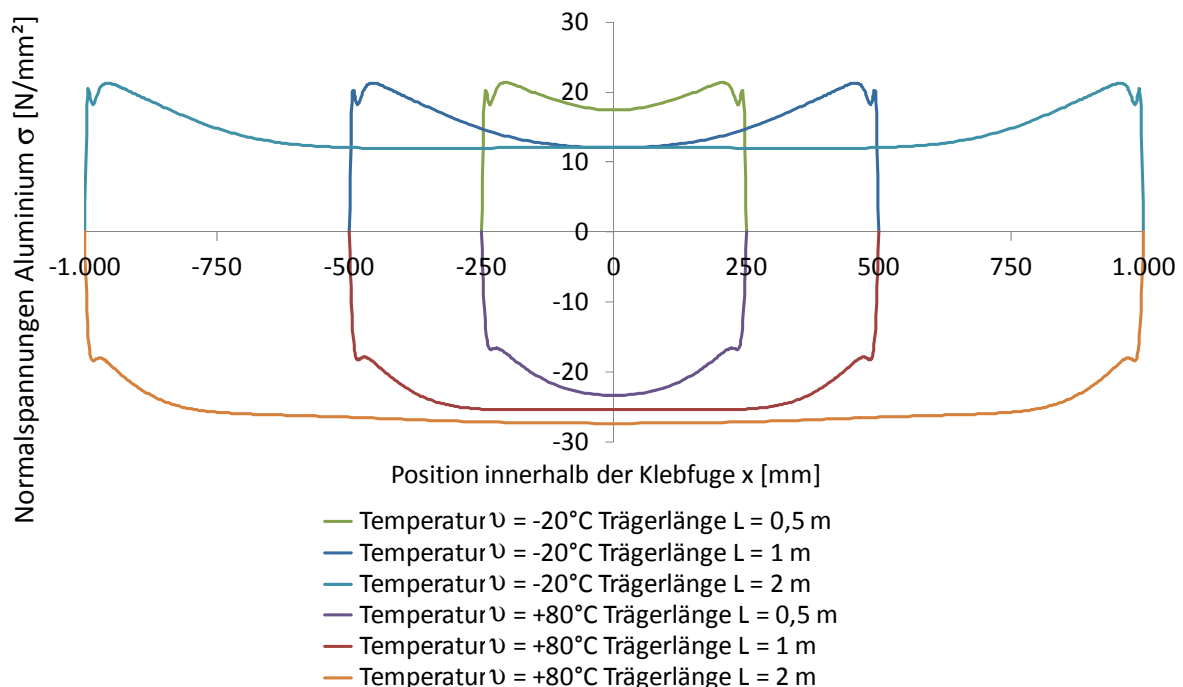


Abbildung 4.39: Ergebnisse der FEM-Analyse von Normalspannung im Aluminiumgurt bei unterschiedlichen Temperaturlasten und Hybridelementlängen

Entscheidend bei der Betrachtung der Normalspannung innerhalb der CFK-Lamelle ist, dass Zugspannungen als unkritisch behandelt werden können, da CFK-Lamellen wesentlich höhere Zugfestigkeiten als Druckfestigkeiten aufweisen. Die maximal in der CFK-Lamelle auftre-

tende Druckspannung stellt eine systemrelevante Kenngröße dar, da ein Versagen der CFK-Lamelle unter Druckbeanspruchung ein Hybridelementversagen auslöst. Im Ergebnis der numerischen Untersuchungen kann festgestellt werden, dass die maximal auftretende Druckbeanspruchung in der CFK-Lamelle ab Trägerlängen von $L \geq 1.000$ mm für den betrachteten Fall als längenunabhängig angesehen werden kann. Die temperaturlastinduzierten Normalspannungen in den CFK-Lamellen des Hybridelementes sind in Abbildung 4.40 dargestellt.

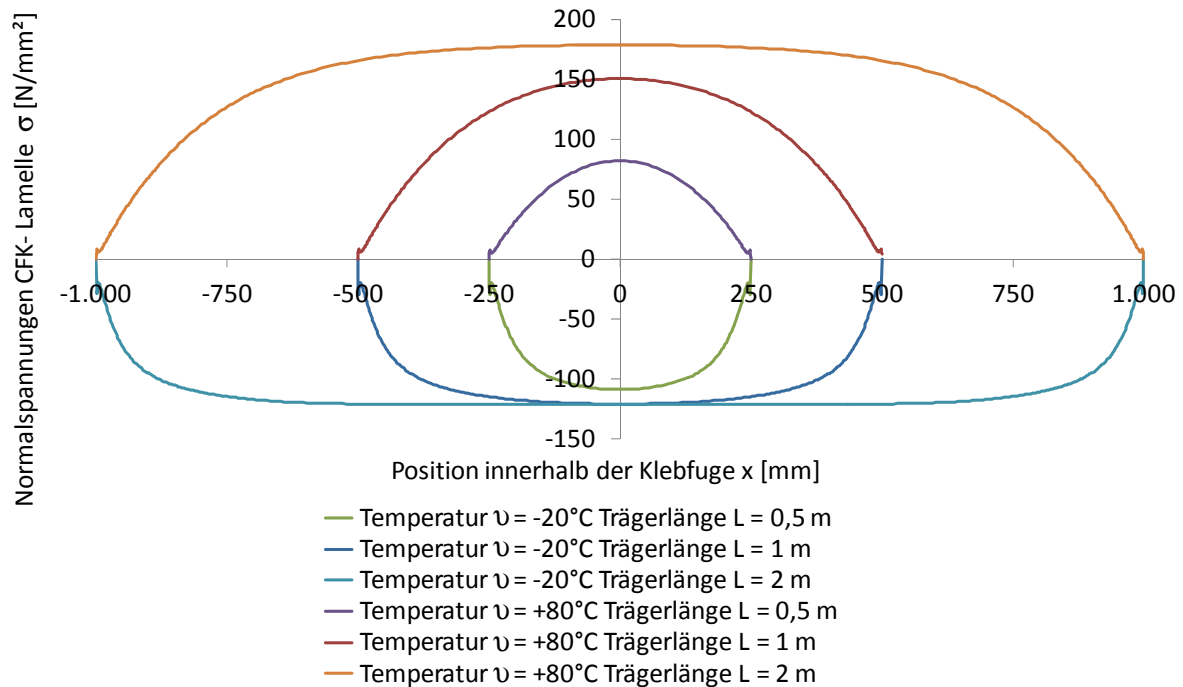


Abbildung 4.40: Ergebnisse der FEM-Analyse von Normalspannung in der CFK-Lamelle bei unterschiedlichen Temperaturlasten und Hybridelementlängen

Bei der Modellierung der mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs ist das viskoelastische Werkstoffverhalten nicht im Materialmodell enthalten. Kriecheffekte, die zu einer Reduzierung der Schub- und Normalspannungen führen, können somit nicht berücksichtigt werden. Daher ist davon auszugehen, dass aufgrund der viskoelastischen und viskoplastischen Klebstoffeigenschaften die Beanspruchungen im Hybridelement insbesondere bei hohen Temperaturen wesentlich geringer sind, als sie hier dargestellt werden. Bei niedrigen Temperaturen $\vartheta \leq 0^\circ\text{C}$ nehmen Kriechvorgänge in ihrer Intensität stark ab. Daher ist für diesen Temperaturlastfall nicht von einer wesentlichen Reduzierung der Beanspruchungen im Hybridelement mit fortschreitender Belastungsdauer auszugehen. Dennoch ist der Lastfall einer tiefen Temperatur als unkritisch zu betrachten, da die gemessenen Schubfestigkeiten der Klebverbindung bei niedrigen Temperaturen stark ansteigen. Die Darstellung der numerisch berechneten Beanspruchungen auf die einzelnen Bestandteile der Hybridelemente stellt damit eine obere Grenze der möglichen Einwirkungen dar.

Für die Modellierung der experimentell durchgeführten 300 Temperaturlastwechsel ist eine sehr genaue Beschreibung des last- und temperaturabhängigen Kriechverhaltens des Klebstoffs eine wesentliche Grundvoraussetzung. Das erfordert Grundlagenuntersuchungen an Klebstoffzugproben, die im zu betrachtenden Temperaturbereich durchzuführen sind. Eine numerische Analyse der Kriechvorgänge auf Basis der ausschließlich bei Raumtemperatur ermittelten Kriech Eigenschaften des Klebstoffs erscheint somit nicht sinnvoll.

Auszugversuche nach Temperaturwechselbeanspruchung

Im Anschluss an die Klimabeanspruchung der Hybridträger erfolgten Auszugversuche der CFK-Lamelle aus den Endstücken des Hybridprofils. Damit ist sichergestellt, dass die Resttragfähigkeit für die Bereiche der Klebverbindung bestimmt wird, die eine maximale Beanspruchung infolge der Klimabelastung erfahren haben. Bereiche in größerer Entfernung von der Verankerungszone der CFK-Lamelle unterliegen weit geringeren Beanspruchungen infolge der Temperaturdehnungsdifferenzen. Dieser Versuch modelliert damit die ungünstigste Beanspruchungssituation. Es konnte kein signifikanter Abfall der Schubfestigkeitseigenschaften der Klebverbindung festgestellt werden. Lediglich die Streuung der Festigkeitswerte nahm geringfügig zu. Infolge der wiederkehrenden Belastung nahm die Steifigkeit des Klebstoffs geringfügig ab, sodass auch die Schubsteifigkeit der Klebverbindung abnahm. Die Versuchsergebnisse sind im Anhang in Abschnitt A.9.4 dargestellt.

4.1.5 Optimierung systemrelevanter Materialparameter

Neben den in Abschnitt 4.1.1 aufgeführten Systemgrundlagen sind eine Reihe von Materialeigenschaften für die Herstellung eines effizienten Hybridsystems relevant. Um ein optimales Systemverhalten bei Alu-CFK-Hybridelementen zu erhalten, sind für die verwendeten Materialien Aluminium, CFK und Klebstoff folgende Kriterien relevant:

- Aluminium,
 - hohe $R_{p0,2}$ -Dehngrenze, Druck- und Zugfestigkeit R_m ,
⇒ Erhöhung der Gesamttragfähigkeit,
 - ausgeprägt plastisches Verhalten bei Überschreitung der $R_{p0,2}$ -Dehngrenze,
⇒ Grundlage für die vollständige Aktivierung der CFK-Lamellentragfähigkeit,
 - gutes Adhäsionsvermögen zwischen Aluminiumoberfläche und Klebstoff,
⇒ strukturelle Verbindung zwischen CFK und Aluminium,
- CFK-Lamelle,
 - hohe Zug- und Druckfestigkeit $f_{u\Box}^+$ und $f_{u\Box}^-$,
⇒ Druck- und Zugkräfte treten bei vorwiegend biegebeanspruchten doppelsymmetrischen Bauteilen in nahezu gleichen Größenordnungen auf,
⇒ Erhöhung der Gesamttragfähigkeit,
 - hoher Elastizitätsmodul,
⇒ CFK-Lamelle nimmt im Verhältnis des Steifigkeitsquotienten zum Aluminium im elastischen Tragbereich Kräfte auf,
⇒ Erhöhung der Steifigkeit und elastischen Grenzbeanspruchbarkeit,
 - gutes Adhäsionsvermögen zwischen CFK-Oberfläche und Klebstoff,
⇒ strukturelle Verbindung zwischen CFK und Aluminium,
- Klebstoff,
 - hohe Adhäsionsfähigkeit an CFK- und Aluminiumoberflächen,
⇒ strukturelle Verbindung zwischen Aluminium und CFK,
 - hohe Steifigkeit und Kohäsionsfestigkeit,
⇒ Klebstoffversagen sollte nicht systemrelevant sein,
⇒ mechanische Kopplung zwischen CFK und Aluminium,
 - hohe Elastizität,
⇒ Ausgleich der Temperaturdehnungsdifferenzen zwischen Aluminium und CFK,
 - Verarbeitungseigenschaften,
⇒ robustes Herstellungssystem mit günstigen Verarbeitungseigenschaften erforderlich.

Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Biegetragfähigkeit des Alu-CFK-Hybridsystems besteht in der Substitution der CFK-Lamelle durch eine Borfaserlamelle. Der ca. 40-mal höhere Durchmesser der Borfasern ermöglicht aufgrund des Stabilitätsverhaltens eine wesentlich höhere Druckfestigkeit verglichen mit CFK-Lamellen. Die Verarbeitung der Borfasern zu diesen Lamellen ist allerdings recht kompliziert, da die minimal zulässigen Biegeradien ungleich größer als bei Kohlenstofffasern sind.

4.2 Untersuchungen ausgewählter Alu-CFK-Hybridelemente

Die in den folgenden Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 diskutierten experimentellen und numerischen Untersuchungen werden an zwei unterschiedlichen Alu-CFK-Hybridelementtypen durchgeführt. Schwerpunkt dieser Untersuchungen ist die Ermittlung der Trageigenschaften der Alu-CFK-Hybridelemente unter anwendungsrelevanten Randbedingungen. Die Hybridelemente sind hinsichtlich einer vorwiegenden Momentbeanspruchung um die y-Achse ausgebildet. Der in Abbildung 4.41a dargestellte Typ 1 repräsentiert ein Tragelement mit mittlerer Momententragfähigkeit. Der Traglastanteil der CFK-Lamelle beträgt bei einer plastischen Momentbeanspruchung $M_{pl,y}$ ca. 24 %. Abbildung 4.41b zeigt den Typ 2, der eine höhere Momententragfähigkeit um die y-Achse aufweist. Der Traglastanteil der CFK-Lamelle beträgt bei Typ 2 ca. 33 % von $M_{pl,y}$. Somit können zwei qualitativ verschiedenartige Hybridquerschnitte experimentell und numerisch analysiert werden.

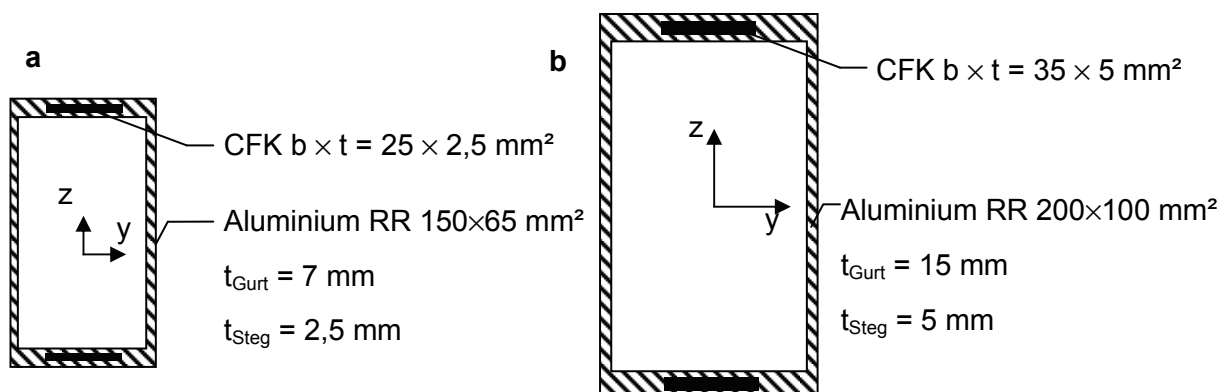


Abbildung 4.41: Ausgewählte Alu-CFK-Hybridquerschnitte; a: Typ 1, RR 150x65; b: Typ 2, RR 200x100 mm²

Die experimentellen und numerischen Untersuchungen werden an unterschiedlichen statischen Systemen durchgeführt:

- dem Einfeldträger und dem
- Kragträger.

Die Untersuchungen am Einfeldträger gestatten grundlegende Analysen der Trageigenschaften von Alu-CFK-Hybridelementen. Aufgrund der geringen Momentengradienten ist die Schubbeanspruchung innerhalb der Klebfuge Aluminium – CFK-Lamelle relativ gering. Eine Relativverschiebung zwischen Aluminium und CFK-Lamelle tritt bei diesem Tragsystem praktisch nicht auf. Damit kann im Wesentlichen von der Theorie des ebenen Querschnitts ausgegangen werden. Die geführten Untersuchungen sind im Anhang in Abschnitt A.9.5 dargestellt.

Untersuchungen an Kragträgern gestatten erweiterte Analysemöglichkeiten. Dazu gehören Analysen:

- der Klebfugenbeanspruchung,
- des nachgiebigen Verbunds,
- von Lastumlagerungseffekten zwischen Aluminium und der CFK-Lamelle.

Ausgewählte der experimentellen und numerischen Untersuchungen an den Alu-CFK-Hybrid-Kragträgern Typ 1 und Typ 2 sind im nachfolgenden Abschnitt 4.2.1 dargestellt.

4.2.1 Statische Kurzeinwirkung

Experimentelle und numerische Untersuchungen des Gesamttragverhaltens

Während der Untersuchungen zur Tragfähigkeit in momentbeanspruchten Trägerendbereichen werden umfangreiche experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgen an zwei unterschiedlichen Profiltypen mit Querschnitten nach Abbildung 4.41.

Die Untersuchung wird an Kragträgern durchgeführt, die mittels zweier Schraubverbindungen eine Einspannung erfahren. Das statische System der Versuchsanordnung ist in Abbildung 4.42 dargestellt.

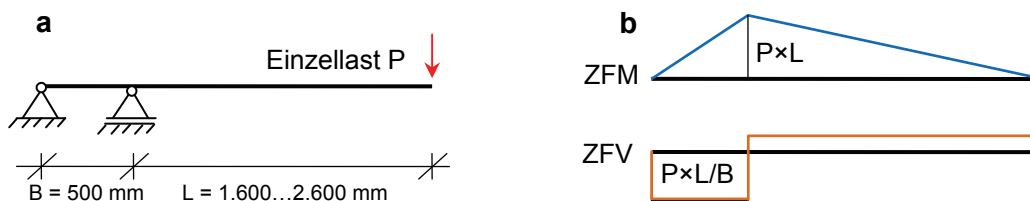


Abbildung 4.42: a: statisches System eines betrachteten Kragträgers mit Einzellast; b: resultierender Schnittkraftverteilung

Die Momentbeanspruchung wird durch eine Einzellast mit einem Hebelarm von $L = 1.600 \dots 2.600$ mm eingetragen. Die Verformung des Trägers wird an zwei Punkten gemessen:

- mittels induktivem Wegaufnehmer mit einer Entfernung vom Bereich der maximalen Momentbeanspruchung $L = 750$ mm,
- mittels Wegaufnehmer am Lasteinleitungspunkt.

Zur Ermittlung der Dehnung im maximal beanspruchten Trägerbereich und zwischen den Schraubverbindungen werden DMS verwendet. Ein Dehnungsmessstreifen wird auf dem zugbeanspruchten Gurt im Bereich des Momentenmaximums angebracht, ein weiterer Dehnungsmessstreifen wird zwischen den Schrauben bei $L = 250$ mm angeordnet. Abbildung 4.43 zeigt die schematische Versuchsanordnung.

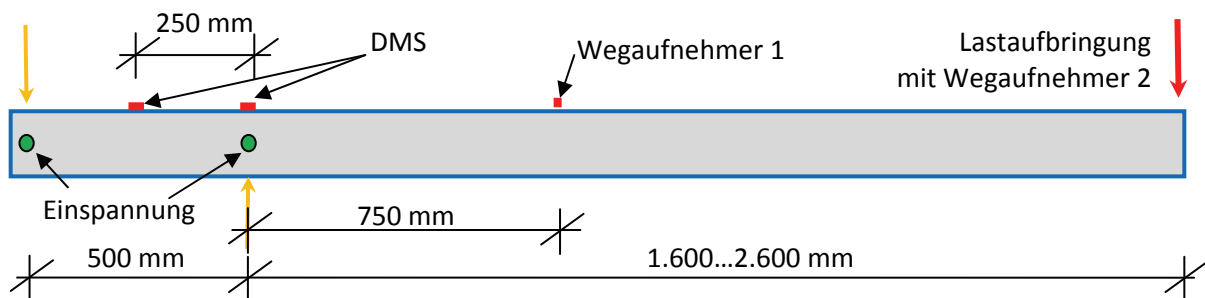


Abbildung 4.43: Schematische Darstellung des Prüfkörpers für einen momentbeanspruchten Trägerendbereich

Die Belastung wird weggesteuert mit einer Verschiebungsgeschwindigkeit von $v = 0,5 \text{ mm/s}$ aufgebracht. Beschleunigungseffekte können damit vernachlässigt werden.

In den Darstellungen auf Abbildung 4.44 wird der aufgebaute Versuch vor und während der Lastaufbringung gezeigt.

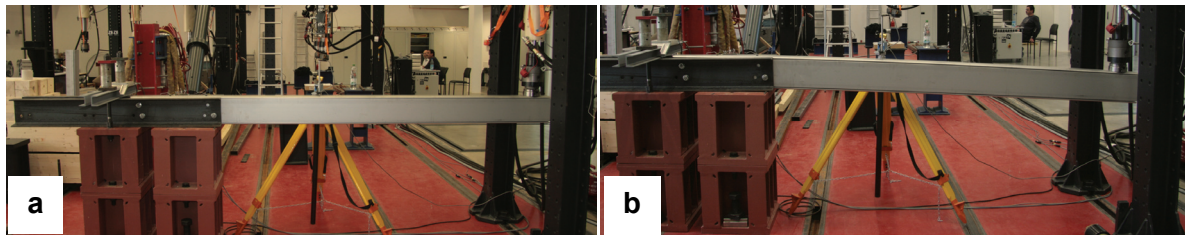


Abbildung 4.44: Versuchsaufbau für die Momentenbeanspruchung am Typ 2; a: Versuchsaufbau und Lastgeschirr vor Lastaufbringung; b: Durchbiegung während der Versuchsdurchführung

Kragträger Typ 1

Die experimentelle Untersuchung am Kragträger vom Typ 1 wird mit unterschiedlichen Momenten/Querkraft-Verhältnissen durchgeführt. Dazu werden die Hebelarme zur Lasteintragung variiert. Die Hebelarme betragen:

- $L = 1.600 \text{ mm}$ und
- $L = 2.600 \text{ mm}$.

Die Moment-Verformungs-Kurven für die Kragträger mit einem lasteinleitenden Hebelarm von $L = 1.600 \text{ mm}$ sind in Abbildung 4.45, und für $L = 2.600 \text{ mm}$ in Abbildung 4.46 dargestellt. Der Vergleich zwischen den Kragträgern mit unterschiedlicher Länge zeigt, dass die mechanische Reaktion des Alu-CFK-Hybridelementes im Wesentlichen unabhängig von lasteinleitenden Effekten erfolgt. Die mechanische Reaktion des Hybridelementes ist vielmehr abhängig von den Systemgrößen:

- des belastenden Maximalmomentes und
- des Hebelarms zur Einleitung des Momentes (Länge der Einspannung).

Der Vergleich mit den experimentell und numerisch analysierten Einfeldträgern zeigt ebenfalls eine enge Analogie des Moment-Verformungs-Verhaltens der Hybridelemente bei elastischer und plastischer Beanspruchung. Diese Untersuchungen werden im Anhang in Abschnitt A.9.5 dargestellt.

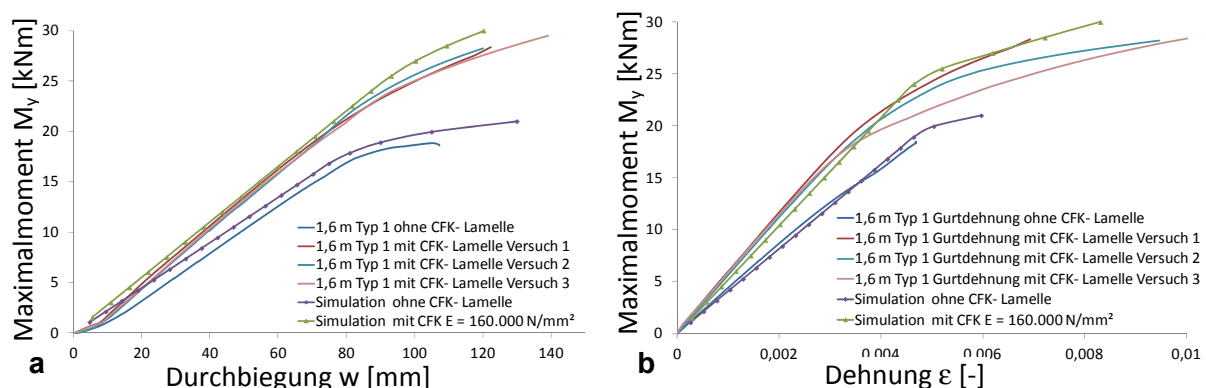


Abbildung 4.45: Ergebnisse des Kragarmversuchs mit Hebelarm $L = 1.600 \text{ mm}$ am Typ1; a: Moment-Verformungs-Kurven unterschiedlicher Wegaufnehmer; b: Dehnungen im Bereich der maximalen Momentbeanspruchung

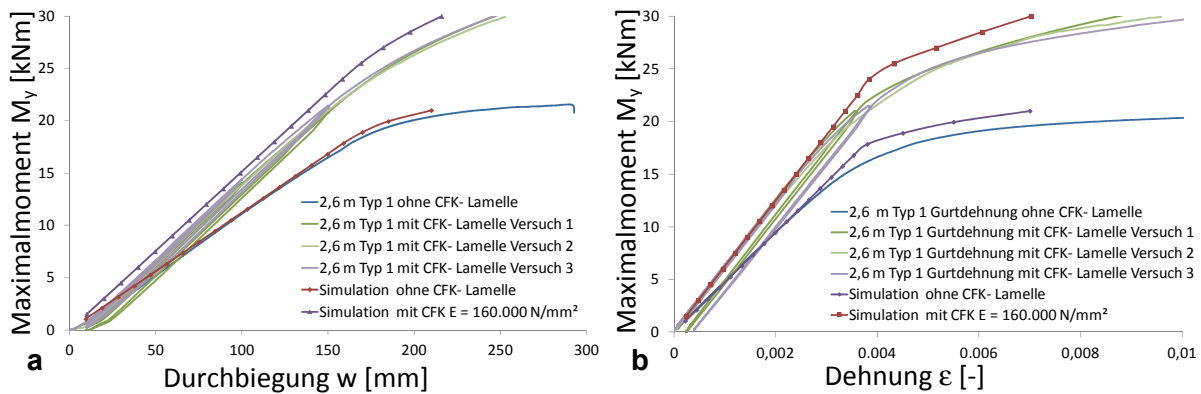


Abbildung 4.46: Ergebnisse des Kragarmversuchs mit Hebelarm $L = 2.600 \text{ mm}$ am Typ1; a: Moment-Verformungs-Kurven unterschiedlicher Wegaufnehmer; b: Dehnungen im Bereich der maximalen Momentbeanspruchung

Beim Vergleich zwischen experimentell und numerisch ermittelten Moment-Verformungs-Kurven zeigt sich eine Parallelverschiebung der experimentellen Moment-Verformungs-Kurve, die durch ein mehrmaliges Be- und Entlasten des Hybridelementes verursacht wird. Lokale Lochleibungsplastizierungen im Auflagerbereich erzeugen eine Vorverdrehung des Trägers, wodurch die Tragfähigkeit des Hybridelementes jedoch nicht negativ beeinträchtigt wird.

Kragträger Typ 2

Analog zu den Untersuchungen am Hybridelement vom Typ 1 wurden für Hybridelemente vom Typ 2 ebenfalls Kragträgeruntersuchungen durchgeführt. Die Versuchskonfiguration ist schematisch in Abbildung 4.43 dargestellt. Der lasteinleitende Hebelarm beträgt $L = 2.400 \text{ mm}$. Abbildung 4.47 zeigt das experimentell und numerisch ermittelte Moment-Verformungs-Verhalten und den Moment-Dehnungsverlauf eines Hybridträgers vom Typ 2.

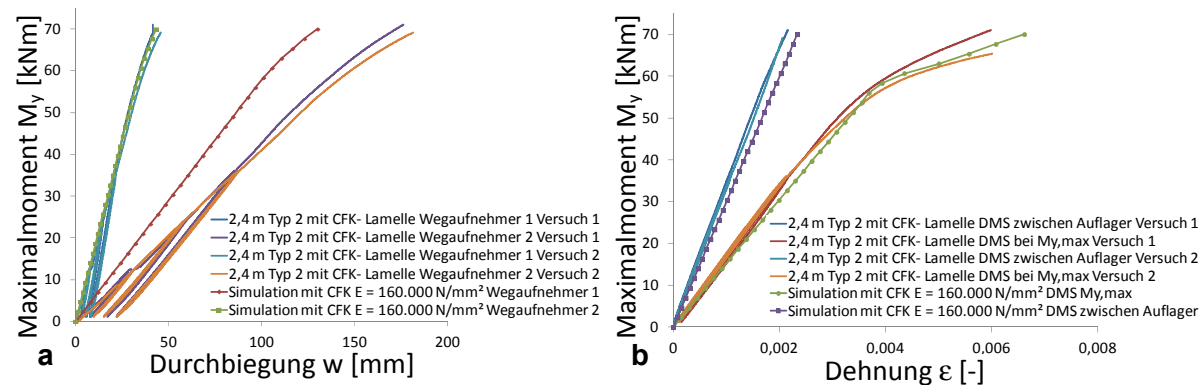


Abbildung 4.47: Ergebnisse des Kragarmversuchs am Typ 2; a: Moment-Verformungs-Kurven unterschiedlicher Wegaufnehmer; b: Dehnungen im Bereich der maximalen Momentbeanspruchung

Im Experiment zeigt das Auflager ein duktils Verhalten. Dies wird durch Lochspiel und die Elastizität der Einspannprofile hervorgerufen. Daraus ergibt sich ein Versatz zwischen den experimentell gemessenen numerisch berechneten Verschiebungen. Dieser Effekt der Lochleibungsplastizierungen kann in Analogie zu den Kragträgeruntersuchungen am Typ 1 betrachtet werden. Der Anstieg der experimentell ermittelten Moment-Verformungs-Kurve verläuft weitgehend parallel zu der numerisch ermittelten Moment-Verformungs-Kurve.

Ergebnisse der Kragträgeruntersuchungen

Bei den untersuchten Kragträgersystemen kann die volle Biegetragfähigkeit des Hybridträgers aktiviert werden. Eine Abminderung der Biegetragfähigkeiten in den querkraftbeanspruchten Bereichen der Konstruktion ist nicht erforderlich. Vorausgesetzt wird, dass der Abstand der Bolzen zur Einleitung des Momentes einen Mindestwert nicht unterschreitet. Andernfalls kann die Schubspannung im Steg des Hybridquerschnittes bzw. in der Verbundfuge zwischen Aluminium und CFK zu einer systemrelevanten Größe werden.

Das Erreichen der Maximalbeanspruchung, bei der ein Versagen eintritt, ist gekennzeichnet durch einen Bruch der druckbeanspruchten CFK-Lamelle. In der Folge verschiebt sich die Nulllinie des Hybridelementes, da die druckbeanspruchte CFK-Lamelle nach dem Druckbruch eine abgeminderte Resttragfähigkeit aufweist. Die zugbeanspruchte CFK-Lamelle bleibt unbeschädigt und nimmt die steigenden Zugbeanspruchungen im Hybridelement auf.

Der Vergleich zwischen experimentellen und numerischen Analysen zeigt sehr gute Übereinstimmungen bezüglich der belastungsabhängig ermittelten Verformungen und Dehnungen im Hybridelement. Während der Belastungsuntersuchungen führt das wiederholte Be- und Entlasten des Kragträgers zu lokalen Auflagerplastizierungen, die im numerischen Modell nicht berücksichtigt werden. Das führt zu einem Versatz zwischen den experimentell gemessenen und numerisch ermittelten Moment-Verformungs-Kurven. Die Auflagerplastizierungen haben jedoch keinen negativen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Hybridelementes, was sich durch erreichte Tragfähigkeiten zeigt, die auf dem Niveau der untersuchten Einfeldbiegeträger liegen.

Numerische Analyse herausgelöster Systembestandteile

Beanspruchungen in der CFK-Lamelle

Die Beanspruchungen innerhalb der CFK-Lamelle sind vorwiegend normalkraftdominiert. Es kann unterschieden werden zwischen elastischer und plastischer Beanspruchung des Aluminiumanteils im Hybridelement. Bei elastischer Beanspruchung werden die Beanspruchungen in Aluminium und der CFK-Lamelle durch den Steifigkeitskoeffizienten zwischen CFK und Aluminium charakterisiert. Bei Plastizierung des Aluminiums nimmt die Normalkraftbeanspruchung innerhalb der CFK-Lamelle überproportional zu. Dementsprechend entstehen dann große Unterschiede zwischen einer ingenieurmäßigen Betrachtung am elastischen Querschnitt und dem numerischen Modell, bei dem Plastizierungseffekte berücksichtigt werden.

Am Beispiel eines Kragträgers vom Typ 1 mit der Belastungssituation nach Abbildung 4.43 werden die Beanspruchungssituationen innerhalb der CFK-Lamelle für unterschiedliche Randbedingungen analysiert. Die lasteinleitende Kragarmlänge beträgt $L = 1.600 \text{ mm}$. Die Normalspannung innerhalb der CFK-Lamelle, aufgetragen über die Trägerlänge, ist für unterschiedliche Modellierungen in Abbildung 4.48 dargestellt. Die Position $x = 0$ entspricht dabei der Position der rechten Schraube und repräsentiert damit den Bereich der höchsten Momentbeanspruchung.

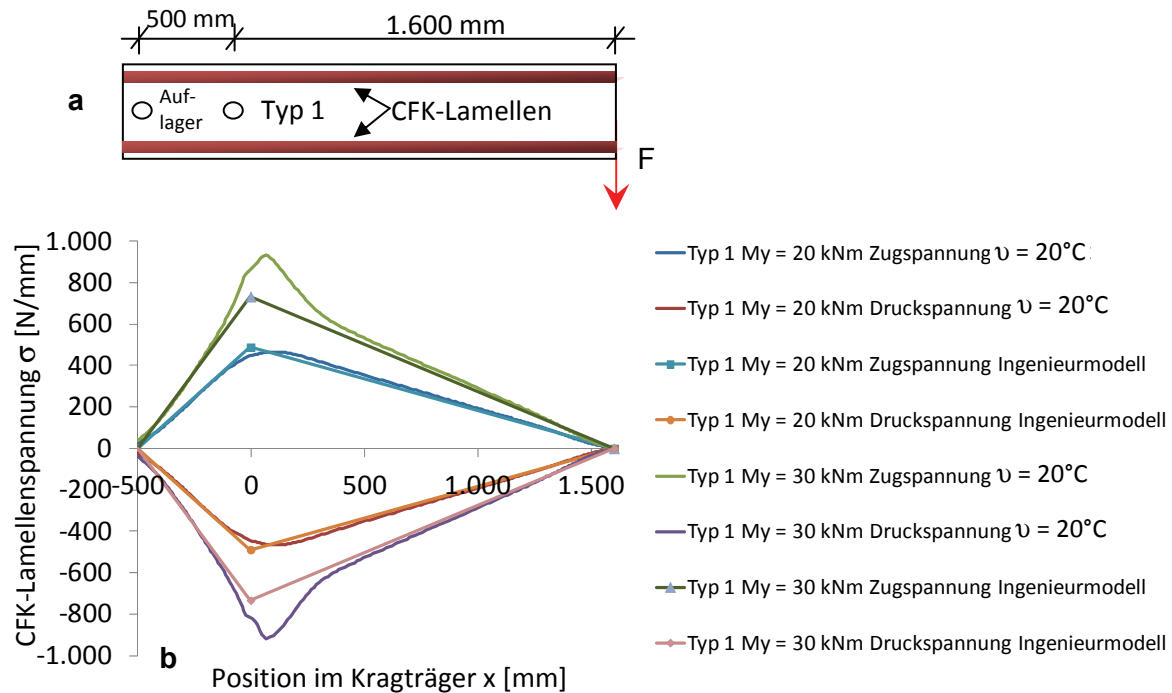


Abbildung 4.48: Ergebnisse der FEM-Analyse von Spannungen in der CFK-Lamelle bei elastischer bzw. plastischer Beanspruchung bei Raumtemperatur, aufgetragen über die Trägerlänge; Kragträger mit Kragarmlänge $L = 1.600$ mm Typ 1; a: statisches System; b: Normalspannungen innerhalb der CFK-Lamelle

Bei ingenieurmäßiger Betrachtung der CFK-Lamellen-Längsspannung nach Abschnitt 4.1.2 kann für elastische Beanspruchungszustände eine weitgehende Übereinstimmung zu den numerisch ermittelten Beanspruchungszuständen festgestellt werden. Bei plastischer Beanspruchung im Aluminiumquerschnitt steigt die Beanspruchung innerhalb der CFK-Lamelle überproportional an. Hier gerät das Ingenieurmodell an seine Grenzen, und die Unterschiede zwischen Ingenieurmodell und FEM-Berechnung nehmen zu.

Die überproportionale Zunahme der Normalspannungen in der CFK-Lamelle bei plastischer Beanspruchung des Hybridelementes ist direkt gekoppelt mit hohen Schubbeanspruchungen in der Klebfuge zwischen Aluminium und CFK.

Die Überlagerung von Beanspruchungen aus Temperaturlast und statischer Belastung führt zu einer Verschiebung der Nulllinie im Hybridelement. Demzufolge überlagern sich Druck- bzw. Zugspannungen, die temperaturlastinduziert im Hybridelement entstehen, mit den Druck- bzw. Zugspannungen, die infolge der statischen Belastung in das Hybridelement eingeleitet werden. Die durch unterschiedliche Temperaturdehnungen entstehende Spannungsverteilung kann als Eigenspannung betrachtet werden. Für den Fall einer elastischen Momentbeanspruchung am Kragträger vom Typ 1 ist der Verlauf der Normalkraftbeanspruchung innerhalb der CFK-Lamelle verteilt über die Trägerlänge in Abbildung 4.49 dargestellt.

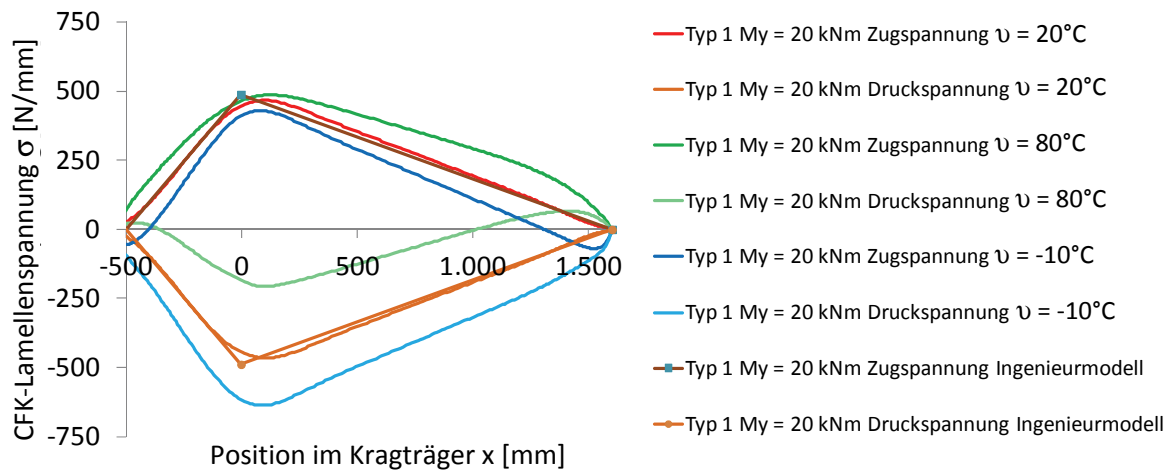


Abbildung 4.49: Ergebnisse der FEM-Analyse von Spannungen in der CFK-Lamelle bei elastischer Beanspruchung und unterschiedlichen Temperaturzuständen aufgetragen über die Trägerlänge, $L = 1.600 \text{ mm}$ Typ 1

Der Nulllinienversatz innerhalb des Hybridquerschnitts, der durch die Temperaturzustände verursacht wird, kann deutlich an den Normalspannungsverläufen innerhalb der CFK-Lamelle beobachtet werden. Ohne Temperatureinwirkung sind die Spannungen in der druck- bzw. zugkraftbeanspruchten CFK-Lamelle vom Betrag her annähernd gleich. Infolge der Temperaturlast kann eine Verschiebung der Normalspannungszustände in Richtung Druckbeanspruchung (für niedrige Temperaturen) oder in Richtung der Zugbeanspruchung (für hohe Temperaturen) beobachtet werden. Dieser Effekt kann ingenieurmäßig auch durch Superposition von temperaturinduzierten Spannungen und Spannungen infolge äußerer Momentbeanspruchung nachvollzogen werden.

Bei statischer Beanspruchung und fortschreitender Plastizierung des Aluminiums verringert sich der Einfluss der Eigenspannung zunehmend, bis bei einer gedachten vollständigen Plastizierung des Aluminiumquerschnitts der Eigenspannungszustand vollständig aus dem Hybridquerschnitt herausgezogen wird. In der praktischen Anwendung wird dieser Zustand jedoch nie erreicht, da in diesem Fall die Beanspruchung in der CFK-Lamelle weit oberhalb ihrer Bruchfestigkeit liegt.

Die Beanspruchungszustände innerhalb der CFK-Lamelle sind für eine plastische Beanspruchung des Hybridelementes in Abbildung 4.50 dargestellt.

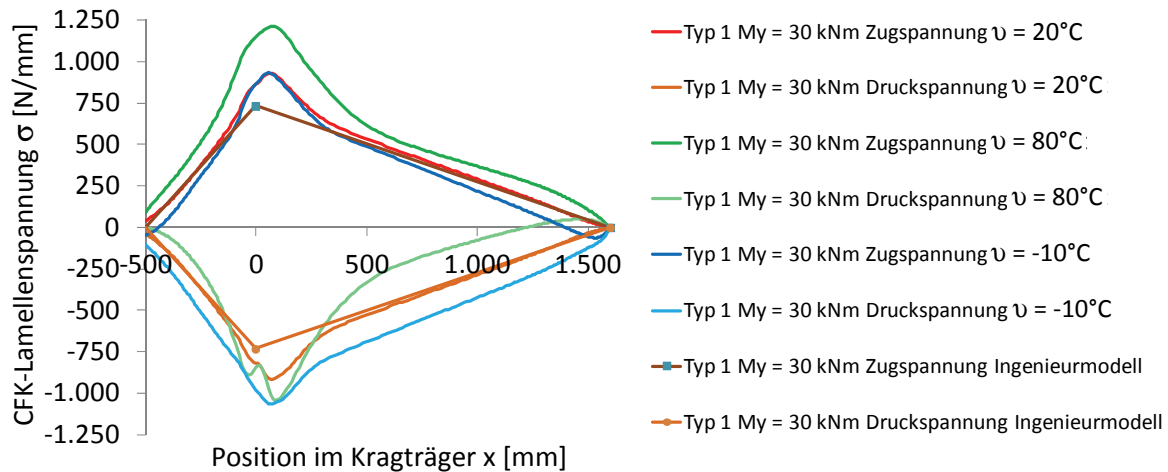


Abbildung 4.50: Ergebnisse der FEM-Analyse von Spannungen in der CFK-Lamelle bei plastischer Beanspruchung und unterschiedlichen Temperaturzuständen aufgetragen über die Trägerlänge, $L = 1.600 \text{ mm}$ Typ 1

Das Verhältnis zwischen Momentbeanspruchung des Hybridelementes und daraus resultierender maximaler CFK-Lamellenspannung ist in Abbildung 4.51 dargestellt.

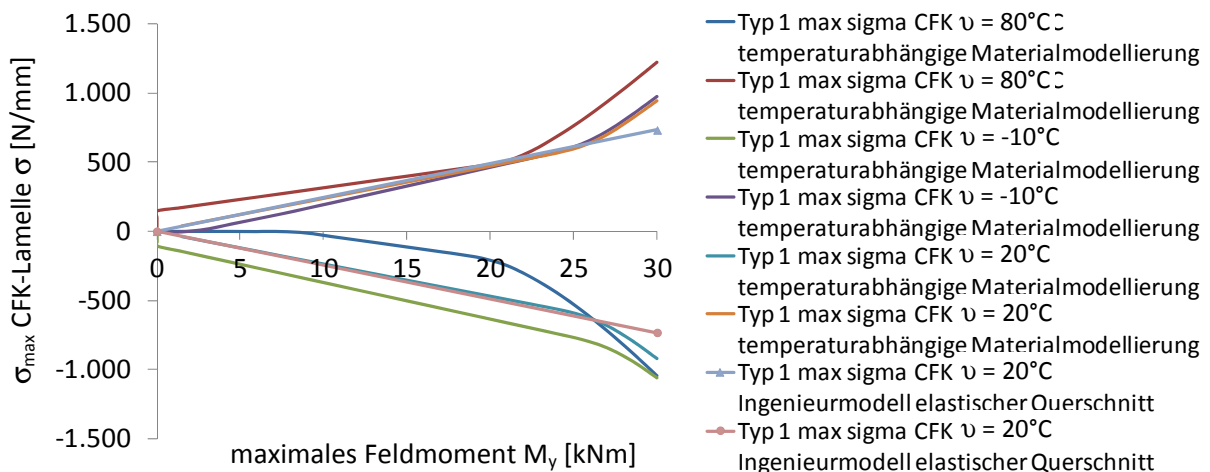


Abbildung 4.51: Ergebnisse der FEM-Analyse von maximalen Spannungen in der CFK-Lamelle in Abhängigkeit von der Biegebeanspruchung bei unterschiedlichen Modellparametern

Bei der Kombination aus plastischer Beanspruchung mit verschiedenen Temperaturzuständen entsteht ein sehr komplexes Beanspruchungsbild im Hybridelement. Das ist im Wesentlichen gekennzeichnet durch:

- den Beanspruchungen infolge statischer Last,
- Temperaturdehnungsdifferenzen innerhalb des Hybridelementes und
- die Temperaturabhängigkeit der Materialkennwerte (Steifigkeit und Plastizitätsgrenze).

Die Kombination aus hoher Temperatur- und statischer Beanspruchung stellt dabei den kritischen Fall dar. Bei einer hohen Temperatur sinken Steifigkeit und Dehngrenze des Aluminiumwerkstoffs leicht ab. Damit steigen die Beanspruchungen, die in der CFK-Lamelle wirken, generell an. Ein gegenläufiger Effekt entsteht durch das Absinken der Steifigkeit der druckbeanspruchten CFK-Lamelle, was wiederum zu einer reduzierten Druckbeanspruchung innerhalb der CFK-Lamelle führt. Jedoch weist die CFK-Lamelle bei hohen Temperaturen eine

verminderte Druckfestigkeit auf, da die Kunststoffmatrix der CFK-Lamelle infolge einer verringerten Steifigkeit die Stabilisierung der Kohlenstofffasern nur begrenzt realisiert.

Beanspruchungen in der Klebfuge

Die Beanspruchungen in der Klebfuge stehen in direktem Zusammenhang mit den Beanspruchungen, die innerhalb der CFK-Lamelle auftreten. Schubspannungen innerhalb der Klebfuge resultieren dabei aus den Normalspannungsgradienten innerhalb der CFK-Lamelle. Die Untersuchungen am Kragträger führen dabei zu qualitativ ähnlichen Ergebnissen, wie sie auch bei den im Abschnitt A.9.5 des Anhangs dargestellten Untersuchungen am Einfeldträger zu beobachten sind.

Bei einer Kombination aus statischer Beanspruchung und Temperaturbelastung kann im elastischen Fall weitestgehend eine lineare Überlagerung der Beanspruchungszustände aus den beiden Beanspruchungsformen festgestellt werden. Für elastische Beanspruchungszustände und unterschiedliche Temperaturen ist die über die Trägerlänge aufgetragene Schubspannung zwischen Aluminium und CFK in Abbildung 4.52 dargestellt.

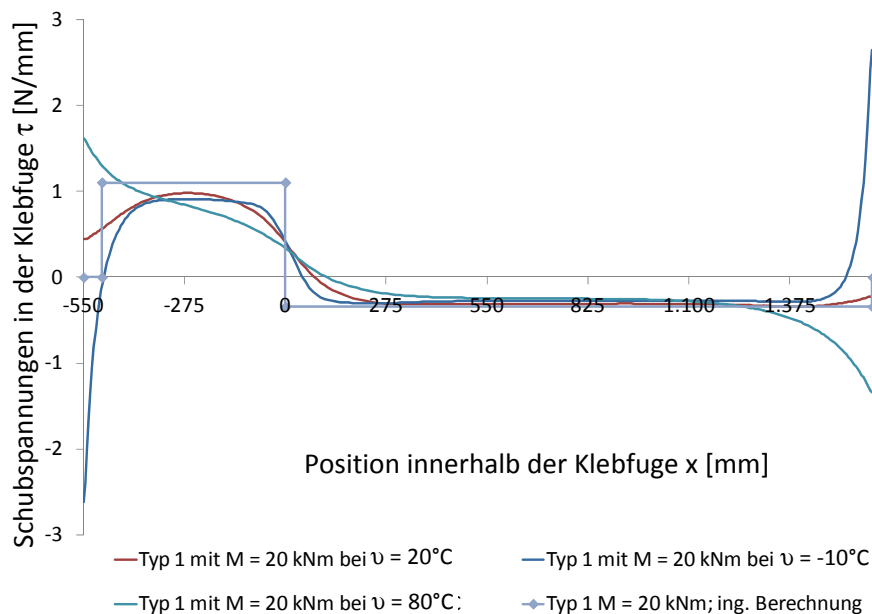


Abbildung 4.52: Ergebnisse der FEM-Analyse von Schubspannungen $\tau_{\text{längs}}$ in der Klebfuge [N/mm²] bei Überlagerung unterschiedlicher elastischer Beanspruchungszustände; Typ 1

Bei plastischen Beanspruchungszuständen steigt in den Bereichen mit Aluminiumplastizierung die Normalspannung innerhalb der CFK-Lamelle stark an. In der Folge entsteht dort eine überproportionale Zunahme der Schubspannungen zwischen Aluminium und CFK. Die aus einer Temperaturlast resultierenden Beanspruchungszustände sind auch bei Beanspruchungskombinationen mit statischen Lasten im System zu erkennen. Abbildung 4.53 zeigt die über die Trägerlänge aufgetragene Schubspannung in der Klebfuge zwischen Aluminium und CFK bei plastischen Beanspruchungszuständen.

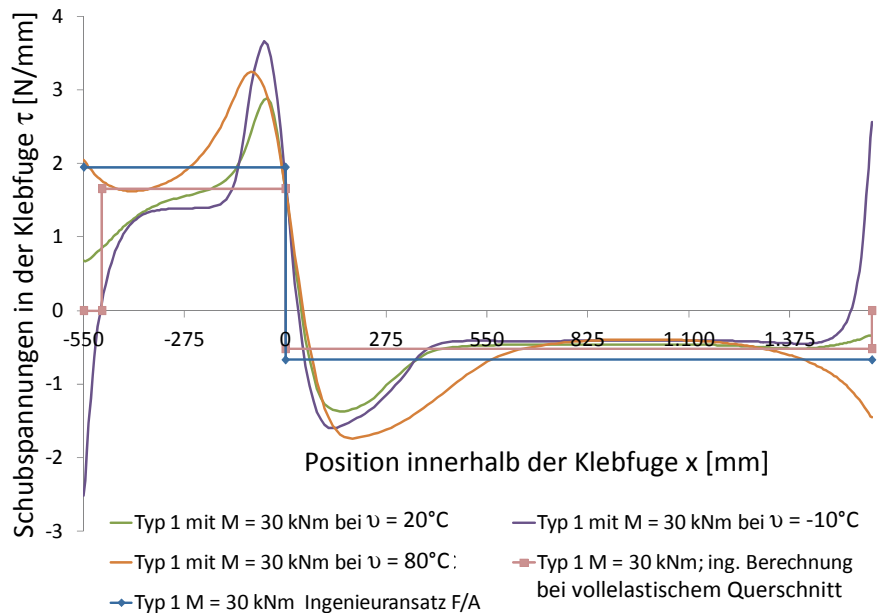


Abbildung 4.53: Ergebnisse der FEM-Analyse von Schubspannungen $\tau_{\text{längs}}$ in der Klebfuge [N/mm²] aufgetragen über die Trägerlänge bei unterschiedlichen plastischen Beanspruchungszuständen; Typ 1

Der Vergleich zwischen ingenieurmäßig nach Abschnitt 4.1.2 und numerisch mittels FEM berechneten Schubspannungen zeigt für ungestörte, elastisch beanspruchte Bereiche des Hybridelementes sehr gute Übereinstimmungen. In den geometrisch gestörten Endbereichen des Trägers gilt die Theorie des ebenen Querschnitts nicht. Daraus entstehen Unterschiede zwischen den verschiedenen Berechnungsansätzen, speziell wenn Temperaturlastfälle mit statischen Beanspruchungen überlagert werden. Die plastische Beanspruchung des Alu-CFK-Hybridträgers führt zu einem signifikanten Anstieg der Normalkraft innerhalb der CFK-Lamelle. Daher kann ein weiterer ingenieurmäßiger Ansatz gewählt werden, um die Schubspannung im plastizierten Trägerbereich besser abschätzen zu können. Die Schubspannung wird dabei über den Lasteinleitungsbereich der CFK-Lamelle als konstant angenommen. Dieser Ansatz repräsentiert die blaue Verteilungsfunktion der Schubspannung auf Abbildung 4.53. Im direkten Bereich der Plastizierung kann jedoch auch diese ingenieurmäßige Betrachtung den Schubspannungsverlauf nur ungenau abbilden. Komplexe FEM-Modelle liefern hier realitätsnähere Abbildungen, da Lasteinleitungsbereiche detaillierter berücksichtigt werden können.

4.2.2 Statische und dynamische Langzeitbeanspruchung

Untersuchungen von Langzeiteinflüssen gestatten eine begrenzte Aussagefähigkeit hinsichtlich zu erwartender Lebensdauern der Alu-CFK-Hybridelemente. Für die Darstellung unterschiedlicher Belastungssituationen wurden zwei verschiedene Versuchsanordnungen gewählt:

- ein Dauerschwingversuch mit Momentenbeanspruchung als Schwellenbelastung und
- eine statische Dauerbelastung als Momentenbeanspruchung zur Abschätzung von Kriechinflüssen bei betragsmäßig hohen Langzeitbelastungen.

Im Anschluss an die Dauerbeanspruchung der Alu-CFK-Hybridelemente erfolgte eine Untersuchung der Resttragfähigkeit, wobei keine Verringerung der Momententragfähigkeit festzu-

stellen war. Details der durchgeführten Untersuchungen sind im Anhang in Abschnitt A.9.6 dargestellt.

4.3 Herstellungsaspekte und Anwendung

Die Produktion von Alu-CFK-Hybridelementen mit gleichbleibend hoher Qualität stellt die Grundlage für den wirtschaftlichen industriellen Einsatz dieser Bauteile als Tragelemente dar. In den folgenden Abschnitten 4.3.1 bis 4.3.3 werden grundlegende Herstellungskonzepte und Anwendungsparameter von Alu-CFK-Hybridelementen beschrieben.

4.3.1 Grundlagen

Die Herstellung von Alu-CFK-Hybridelementen ist durch ein zweistufiges Verfahren geprägt. In der ersten Stufe erfolgt die Herstellung der Ausgangskomponenten, also des Aluminiumprofils und der CFK-Lamellen. Im zweiten Schritt werden Aluminiumprofil und CFK-Lamelle durch eine strukturell wirksame Klebung miteinander verbunden, wobei das Alu-CFK-Hybridelement entsteht.

Bei der Herstellung von Alu-CFK-Hybridelementen ist insbesondere auf folgende, für die spätere Nutzung sicherheitsrelevante, Aspekte zu achten:

- Kontrolle der Ausgangswerkstoffe hinsichtlich geforderter Materialeigenschaften,
- Kontrolle der Querschnittsgeometrien,
- Anwendung eines robusten Fertigungsverfahrens.

4.3.2 Industrielle Produktion von Alu-CFK-Hybridelementen

Für die industrielle Produktion von Alu-CFK-Hybridelementen sind spezielle Produktionsanlagen erforderlich, die in Verbindung mit geschultem Personal ein robustes Fertigungsverfahren ermöglichen. Das Fertigungsverfahren ist zu optimieren hinsichtlich:

- konstanter hoher Fertigungsqualität,
- niedriger Taktzeiten,
- eines hohen Automatisierungsgrades.

Das Produktionsverfahren hat einen wesentlichen Anteil für eine erfolgreiche Anwendung der Alu-CFK-Hybridelemente im Bauwesen. Das aktuell angewandte Verfahren ist gekennzeichnet durch eine robuste Fertigung, die reproduzierbar geringe Streubreiten in den mechanischen Eigenschaften der produzierten Alu-CFK-Hybridelemente gewährleistet. Die sicherheitsrelevanten Kenngrößen werden mittels Eigen- und Fremdüberwachung stetig kontrolliert.

4.3.3 Parameter der Anwendung

Alu-CFK-Hybridelemente zeichnen sich besonders durch einen hohen Quotienten zwischen Biegebeanspruchbarkeit und Eigengewicht aus. Damit ist diese Art der Hybridbauteile besonders für die Erstellung tragender Strukturen geeignet, bei denen es auf ein möglichst geringes Eigengewicht ankommt. So können Transport- und Montagevorgänge erleichtert werden, was vor allem bei fliegenden Bauten einen großen Vorteil darstellt. Ein Anwendungsbe-
reich, in dem besonders gewichtsoptimierte Tragelemente in Alu-CFK-Hybridbauweise nachgefragt werden, stellen Tragkonstruktionen fliegender Bauten dar. Durch den Ersatz herkömmlicher Aluminiumtragelemente mit Alu-CFK-Hybridelemente ist es möglich, Trans-

port und Montagevorgänge zu vereinfachen. Der praktische Einsatz von Alu-CFK-Hybridelementen wird im Anhang in Abschnitt A.9.10 beschrieben.

4.4 Bemessungskonzept

Die Bemessung von Alu-CFK-Hybridelementen hinsichtlich definierter Randbedingungen stellt eine wesentliche Grundlage für deren baupraktischen Einsatz dar. In den folgenden Abschnitten 4.4.1 und 4.4.2 werden Bemessungsansätze dargestellt, die im Rahmen der Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung angewendet wurden.

4.4.1 Sicherheitsbetrachtungen

Alu-CFK-Hybridträger können nicht auf der Basis vorhandener Normendokumente dimensioniert werden und stellen damit keine genormten Bauteile dar. Sie bedürfen deshalb bei der Anwendung im baurechtlich relevanten Gebiet einer Zulassung durch die entsprechende Behörde. In Deutschland ist dies das Deutsche Institut für Bautechnik.

Die Festlegung der Parameter, Grenzwerte und Sicherheitsgrößen für die Bewertung der Tragfähigkeit von Profilen mit Hybridquerschnitten aus stranggepressten Aluminiumhohlkästen mit eingeklebten CFK-Lamellen erfolgt mittels vorhandener experimenteller Daten unter Einbeziehung normierter Kenngrößen auf der Basis semiprobabilistischer Betrachtungen.

Für die Bemessung hinsichtlich der Tragfähigkeit von Aluminium-CFK-Hybridelementen wird die Ermittlung plastischer Querschnittskennwerte empfohlen. Der Bemessungsansatz erfolgt dann elastisch-plastisch. Bei einer rein elastischen Betrachtung wird die Tragfähigkeit des CFK nur teilweise aufgrund der Steifigkeitsdifferenz zwischen Aluminium und CFK genutzt. Die elastische Bemessung von Aluminium-CFK-Hybridelementen ist für die Abgrenzung der Gebrauchstauglichkeit erforderlich.

Rotationskapazität und plastische Bemessung

Eine plastische Bemessung setzt das Vorhandensein von plastischem Rotationsvermögen im plastizierenden Querschnitt voraus. Die Aluminium-CFK-Hybridelemente können dabei plastische Gelenke bilden, eine Schnittgrößenumlagerung ist jedoch nicht vorgesehen. Um Plastizierungen im Querschnitt zu ermöglichen, ohne dass ein Stabilitätsversagen eintritt, ist die Einhaltung definierter Schlankheitsparameter erforderlich. Für Aluminiumtragwerke besteht die Möglichkeit, normative Regelungen zu nutzen. So ist bei Einhaltung der in DIN ENV 1999-1-1:2007 (Deutsches Institut für Normung, 2007) beschriebenen Querschnittsklasse 2 ein Plastizieren des Aluminiums im Querschnitt erlaubt, ohne dass eine Schnittgrößenumlagerung eintritt. Bei der Ermittlung der zulässigen Schlankheitsparameter ist besonders auf die stark plastizierenden Bereiche in den Gurten und Stegansetzen zu achten. Dies kann durch die Einhaltung definierter b/t Verhältnisse gewährleistet werden.

Elastische und plastische Querschnittskennwerte

Die Ermittlung elastischer und plastischer Querschnittskennwerte stellt eine Grundlage für die Bemessung eines Bauteils hinsichtlich verschiedener Beanspruchungszustände dar. Für allgemeine Kastenquerschnitte als Alu-CFK-Hybridquerschnitt ist die Ermittlung wesentlicher Querschnittskennwerte im Anhang in Abschnitt A.9.8 dargestellt.

Tragfähigkeiten für ständige Einwirkungen

Für ausschließlich ruhende permanente Einwirkungen (z. B. Belichtung, Werbung usw.) sind Grenzwerte für die Beanspruchung notwendig. Auf der sicheren Seite liegend wird dabei ein

Grenzwert unterhalb der Momententragfähigkeit des unverstärkten Aluminiumprofils vorgegeben.

Belastungsversuche über längere Zeiträume zeigen bisher keine bleibenden Spannungen oder Verformungen nach der Entlastung. Die Hybridträger reagieren vollständig elastisch. Basierend auf den Erkenntnissen, die aus experimentellen und numerischen Untersuchungen gewonnen wurden, werden für die Berechnung einer zulässigen Dauerbeanspruchung der Hybridträger Obergrenzen definiert:

$$M_{y,\text{permanent}} \leq \frac{2}{3} \times M_{y,\text{el,Aluminiumquerschnitt}} \quad (4.26)$$

$$M_{y,\text{permanent}} \leq \frac{1}{3} \times M_{y,\text{pl,Alu-CFK Hybridelement}} \quad (4.27)$$

Relaxation der Klebverbindung und plastische Bemessung

Bei Temperaturen über $\vartheta = 60^\circ\text{C}$ könnten bei entsprechenden Beanspruchungssituationen Kriechverformungen innerhalb der Klebfuge auftreten. Als wesentliche Langzeiteinwirkung ist dabei das Eigengewicht vorhanden. Bei der Beurteilung des Einflusses von Kriechvorgängen auf das Tragverhalten und die Grenztragfähigkeit ist zu berücksichtigen, dass im ungünstigsten Fall die Steifigkeit der Alu-CFK-Hybridträger das etwa 1,4-fache der reinen Aluminiumträger beträgt. Diese sind relativ unempfindlich gegen Temperatureinwirkungen im hier betrachteten Bereich. Sollte es trotzdem zu Kriecheinflüssen kommen, werden diese durch die Tragfähigkeit der Aluminiumprofile bei Erreichen einer Grenzkriechgröße gestoppt.

Spannungsumlagerungen infolge des Einfrierens eines Kriechzustandes werden im Grenzbereich durch die möglichen plastischen Dehnungen ausgeglichen. Damit werden vorgelagerte elastische Anfangszustände ausgeglichen. Im Grenzbereich wären lediglich veränderte Verformungszustände zu betrachten. Da davon ausgegangen werden kann, dass die Grenztragfähigkeitszustände aus Windbeanspruchungen mit unsymmetrischen Systemverformungen erfolgen, die Kriechzustände aber aus symmetrischen Systemzuständen (Eigengewicht) resultieren müssten, dürften diese Verformungseinflüsse kaum maßgebend werden.

In diesem Sinne kann davon ausgegangen werden, dass Kriechverformungen, die zur Beeinflussung der Grenztragfähigkeit der Verbundprofile führen, nicht zu erwarten sind.

4.4.2 Zuverlässigkeitsbetrachtung mittels stochastischer Methoden

Stochastische Methoden bieten die Möglichkeit, eine sehr praxisbezogene Bestimmung der Trageigenschaften von Hybridelementen auf Basis von experimentellen Untersuchungen durchzuführen. Eine praktische Möglichkeit zur Bestimmung von Tragfähigkeitseigenschaften von Hybridelementen stellt die Monte-Carlo-Simulation dar. Die Simulation ermöglicht eine komplexe Betrachtung der Eigenschaftsverteilungen von Hybridsystemen, die aus unterschiedlichen Ausgangskomponenten mit spezifischen Verteilungen hervorgehen. Im Anhang in Abschnitt A.9.9 wird eine Zuverlässigkeitsbetrachtung an einem spezifischen Alu-CFK-Hybridelement mittels Monte-Carlo-Simulation dargestellt.

5 Glas-Kunststoff-Hybridelemente

Durch Kombination der mechanischen Eigenschaften von steifen, aber spröden Glas mit weichen, duktilen Kunststoffen in einem Glas-Kunststoff-Hybridelement ist es möglich, transparente Tragsysteme herzustellen, die eine für den Einsatz im Bauwesen ausreichende Tragsicherheit aufweisen. In diesem Kapitel werden die optischen und mechanischen Besonderheiten derartiger Hybridsysteme beschrieben.

5.1 Grundlagen

Transparente Glas-Kunststoff-Hybridelemente erhalten durch das Zusammenwirken des steifen, spröden Glases und des weichen, duktilen Kunststoffs ein berechenbares Systemtragverhalten, das als hybride Kreuzung beider Ausgangswerkstoffe betrachtet werden kann. Die grundlegenden Zusammenhänge und Wechselwirkungen solcher Hybridsysteme werden in den folgenden Abschnitten 5.1.1 bis 5.1.4 beschrieben.

5.1.1 Einleitung

Transparente Glaskonstruktionen werden in immer größerem Umfang und unter Nutzung modernster Tragsysteme im Bauwesen eingesetzt. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass tragende Glas-Kunststoff-Hybridträger möglich und für die Herstellung des Verbundes zwischen Glas und Kunststoff geeignete Klebstoffe vorhanden sowie Oberflächenvorbehandlungen nutzbar sind. Der Einsatz von Verbundelementen aus Glas und Polycarbonaten oder Polyamiden verspricht die Möglichkeit, neue (Glas-) Querschnittsformen zu fügen, die in ihrer Tragwirkung den bekannten optimierten Querschnittsformen des Stahlbaus ähneln. Das heißt, es wird möglich, T-Profile, Kästen usw. in Formen zu fertigen, die sowohl Tragfähigkeits- als auch Sicherheitskriterien erfüllen (Werner, 2004; Werner, 2008).

Kunststoffe, die sowohl transparent als auch hoch duktil sein können, bieten die Möglichkeit, neuartige Konstruktionselemente als Koppelglied zwischen Glasscheiben sowie als Verbindungselemente zwischen verschiedenen Querschnittsteilen von Profilen bzw. Bauwerksteilen zu entwickeln. Erkenntnisse zum Tragverhalten, zur Herstellungstechnologie, zur Dauerhaftigkeit und zur Robustheit bilden eine notwendige Voraussetzung, um einerseits eine zielführende Entwicklung solcher Elemente zu gewährleisten und andererseits Bemessungsgrundlagen für einen konstruktiven Einsatz aufzustellen. Ziel ist es, ein dauerhaft transparentes und über den Nutzungszeitraum tragfähiges Element unter Verwendung von Glas und Kunststoff herzustellen. Gegenwärtig stehen eine Vielzahl von hochwertigen Glas- und Kunststoffarten zur Verfügung. Die Auswahl eines geeigneten Klebstoffes, insbesondere beim großflächigen Zusammenkleben der beiden Werkstoffe zu Scheiben, stellt eine zentrale Aufgabenstellung dar. Weiterhin muss eine Technologie entwickelt werden, die es gestattet, eine dauerhafte, möglichst spannungsarme und optische ungestörte Verbindung herzustellen.

Ausgehend von den bisher gewonnenen Erkenntnissen sind die grundlegenden Herstellungsverfahren und Trageigenschaften von Bauelementen zu erforschen, die als Hybrid- bzw. Sandwichkonstruktion Glas-Kunststoff-Glas produziert werden. Die Zielstellung besteht in der Erarbeitung und Darstellung grundlegender Aussagen zur praktischen Anwendbarkeit von Glas-Kunststoff-Hybridelementen mit typischen Querschnitten biegebeanspruchter Bauteile, wie T- und Doppel-T-Querschnitte.

Die vorhandenen Erfahrungen gestatten die Aussage, dass Querschnittsformen unter Nutzung der Ausgangsmaterialien Glas – Kunststoff – verschiedene Klebstoffe praktisch realisierbar sind. Fundierte Aussagen zu optimalen Werkstoffkombinationen hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit liegen nicht vor. Dazu sind insbesondere folgende Problemstellungen zu untersuchen:

- Gestaltung und Bemessung von Verbindungen und Fugen mit unterschiedlichen Beanspruchungen. Hier sind sowohl die generelle Verklebung der Flächen zwischen Glas und Kunststoff gemeint als auch das Zusammenfügen von Querschnittsteilen und Bauelementen.
- Wirkung lokaler Kraftangriffe für statische Einwirkungen. Echte dynamische Einwirkungen besitzen gegenwärtig keine Bedeutung.
- Auswirkung von Temperaturveränderungen auf den inneren Beanspruchungszustand des mehrschichtigen Querschnitts. Insbesondere sind Verformungszustände aus unsymmetrischer Querschnittsgestaltung und ihr Einfluss auf die Grenztragfähigkeit zu betrachten.
- Gewährleistung der Dauerhaftigkeit bei zeitlich gerafften Temperaturzyklen mit großen Amplituden, der Anwesenheit von Feuchtigkeit und UV-Einwirkung.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind für Vordimensionierungen und einfache Einwirkungssituationen in praktikable Bemessungsregeln zu überführen.

Angestrebt wird die Erstellung eines vollständig transparenten Bauwerkes das aus Glas-Kunststoff-Hybridelementen besteht. In diesem Zusammenhang ist es notwendig, einen Bemessungsansatz zu erarbeiten, der es ermöglicht, Glas-Kunststoff-Hybridelemente hinsichtlich ihrer anzusetzenden Tragfähigkeit und -sicherheit zu bewerten. Dabei können experimentelle und numerische Untersuchungen angewendet werden, um Einflüsse natürlicher Witterung bzw. Belastung auf entsprechende Hybridelemente zu beschreiben.

5.1.2 Ingenieurmäßige Betrachtung

Bei der ingenieurmäßigen Betrachtung von Glas-Kunststoff-Hybridelementen erfolgt eine Fallunterscheidung in zwei Systemzustände:

- Zustand I: ungeschädigter Zustand,
 - Zustand der Gebrauchstauglichkeit,
 - Glas und Kunststoff können auf Druck und Zug beansprucht werden.
- Zustand II, nach Glasbruch,
 - Zustand der Tragfähigkeit,
 - Glas kann auf Druck, Kunststoff auf Druck und Zug, beansprucht werden.

Für einen doppelsymmetrischen Querschnitt, wie beispielhaft in Abbildung 5.1 gezeigt, kann der Dehnungs- und Spannungszustand bei reiner Momentbeanspruchung im Zustand I vereinfachend unter Annahme eines ebenbleibenden Querschnitts betrachtet werden.

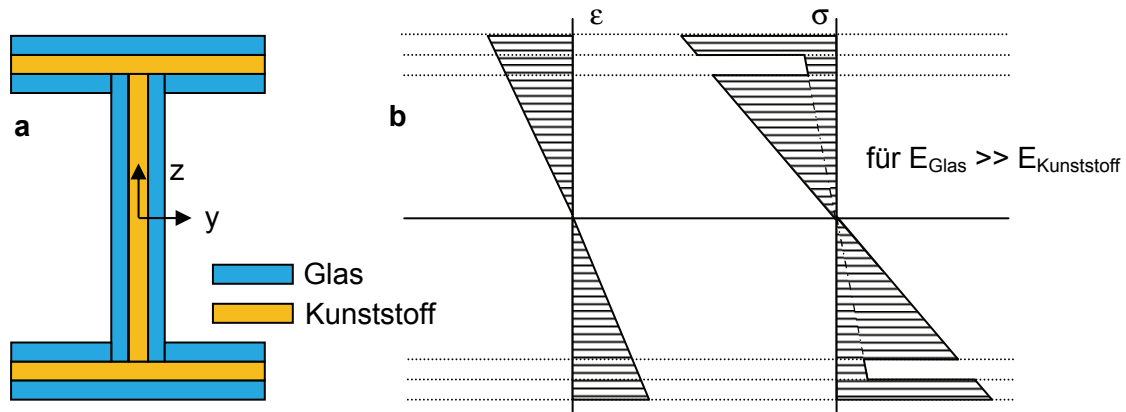


Abbildung 5.1: a: Aufbau eines Glas-Kunststoff-Hybridelementes im Querschnitt; b: Dehnungs- und Spannungszustand bei reiner Momentbeanspruchung M_y

Für den ungeschädigten Zustand I berechnet sich die Steifigkeit des Hybridelementes, bezogen auf die Steifigkeit vom Glas mit:

$$(E \times A)_{\text{Hybrid, effektiv}} = E_{\text{Glas}} \times A_{\text{Glas}} + E_{\text{Kunststoff}} \times A_{\text{Kunststoff}} . \quad (5.1)$$

Bezogen auf die Steifigkeit des Glases können dann effektive Querschnittswerte $A_{\text{Hybrid, effektiv}}$ und $I_{\text{Hybrid, effektiv}}$ für den Hybridquerschnitt definiert werden:

Längssteifigkeit:

$$A_{\text{Hybrid, effektiv}} = A_{\text{Glas}} + A_{\text{Kunststoff}} \times \frac{E_{\text{Kunststoff}}}{E_{\text{Glas}}} . \quad (5.2)$$

Biegesteifigkeit:

$$I_{\text{Hybrid, effektiv}} = I_{\text{Glas}} + I_{\text{Kunststoff}} \times \frac{E_{\text{Kunststoff}}}{E_{\text{Glas}}} . \quad (5.3)$$

Normalspannungen infolge Biegung und Normalkraft können dann für die verschiedenen Werkstoffe berechnet werden mit:

$$\sigma_{\text{Glas}} = \frac{N}{A_{\text{Hybrid, effektiv}}} + \frac{M}{I_{\text{Hybrid, effektiv}}} z , \quad (5.4)$$

$$\sigma_{\text{Kunststoff}} = \left(\frac{N}{A_{\text{Hybrid, effektiv}}} + \frac{M}{I_{\text{Hybrid, effektiv}}} z \right) \times \frac{E_{\text{Kunststoff}}}{E_{\text{Glas}}} . \quad (5.5)$$

Der Steifigkeitsquotient zwischen Glas und Kunststoff $E_{\text{Glas}}/E_{\text{Kunststoff}}$ nimmt für die eingesetzten Werkstoffe oft einen Wert von 20 und mehr an. Damit sind die Normalkraftbeanspruchungen des Kunststoffes $\sigma_{x, \text{Kunststoff}}$ im Zustand I sehr gering.

Voraussetzung für die Beschreibung des in Abbildung 5.1 skizzierten Spannungs- und Dehnungsverlaufes ist eine hochsteife strukturelle Kopplung der Hybridelementbestandteile untereinander. Diese Kopplung erfolgt über Klebverbindungen, die in dem kritischen Schnitt, der Kopplung von Steg und Gurt, zu betrachten sind.

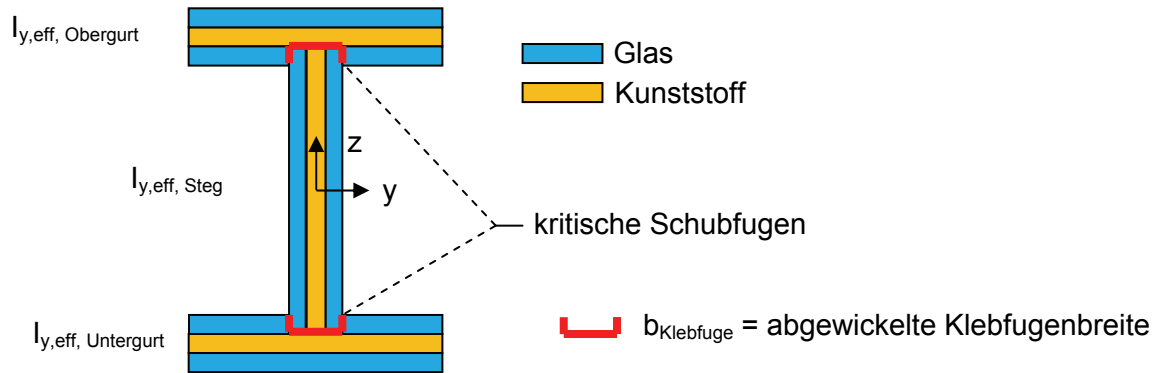


Abbildung 5.2: Kritische Schubfugen bei reiner Momentbeanspruchung M_y

Unter Annahme einer mittleren Schubspannung, verteilt über die kritische Schubfuge ergibt sich:

$$\tau_{\text{Klebfuge}} = \frac{2V_z}{h_{\text{gesamt}} \times b_{\text{Klebfuge}}} \times \frac{I_{y,\text{eff,Gurt}}}{I_{y,\text{Hybrid,effektiv}}} \quad (5.6)$$

Im gerissenen Zustand II fällt das Glas in seiner mechanischen Wirkung auf der Zugseite des Hybridelementes aus. Die freiwerdende Bruchenergie muss von dem Kunststoff und der Duktilität der Klebverbindung abgefangen werden. Im Druckbereich des Hybridelementes besteht die mechanische Wirkung des Glases weiterhin. Damit verschiebt sich der Schwerpunkt und bei rein biegebeanspruchten Hybridelementen auch die Nulllinie des Tragquerschnitts.

Die plastische Momententragfähigkeit im Zustand II bei reiner Biegebeanspruchung ist durch ein Kräftegleichgewicht zu bestimmen,

$$F_{\text{Kunststoff,Zugbereich}} = F_{\text{Glas,Druckbereich}} + F_{\text{Kunststoff,Druckbereich}} \quad (5.7)$$

Der Kunststoff erfährt dann im Druckbereich eine sehr geringe Beanspruchung, da der Steifigkeitsunterschied zwischen Glas und Kunststoff weiterhin besteht.

Durch Festlegung einer zulässigen Druckspannung für das Glas kann eine Nulllinie für das Hybridelement errechnet werden. Infolge der hohen Druckbeanspruchbarkeit von Glas, verglichen mit der Zugbeanspruchbarkeit des Kunststoffs, liegt die Nulllinie meist im Bereich des Druckgurtes des Hybridelementes. Damit kann die Tragwirkung des Glases im Stegbereich und dem gezogenen Gurt nicht angesetzt werden.

5.1.3 Ausgangswerkstoffe

Die Wahl geeigneter Ausgangswerkstoffe ist für die optischen und mechanischen Eigenschaften des Glas-Kunststoff-Hybridelementes von wesentlicher Bedeutung. Bei der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Verbundkomponenten des Hybridsystems wird unterschieden in:

- Glas,
- Kunststoff,
- Klebfuge / Glas-Kunststoff bzw. Kunststoff-Kunststoff.

Glas

Glas ist vor allem gekennzeichnet von seinem im Bereich des sichtbaren Lichts transparenten Charakter. Ursache für die Transparenz ist der amorphe Zustand der Atomgitterstruktur des Glases. Im Gegensatz zu anderen kristallinen Materialien, wie z. B. Metallen, sind hier die Atome in der ungeordneten Struktur einer unterkühlten Flüssigkeit angeordnet. Die Transparenz von Glas ist wesentlich von seiner molekularen Zusammensetzung abhängig. Legierungselemente, wie z. B. Bleioxid, haben einen großen Einfluss auf den transparenten Wellenlängenbereich des Werkstoffs. Im IR- und UV-Bereich ist Glas nahezu vollständig opak. Das ermöglicht z. B. die Anwendung von Laserbearbeitungsverfahren mit CO₂-Laser.

Glas ist in seiner mechanischen Eigenschaft weitgehend geprägt von seinem isotrop-linear-elastischem Materialverhalten. Die Steifigkeit des Glases liegt mit $E = 70.000 \text{ N/mm}^2$ im Bereich von Aluminium. Glas weist sehr hohe Festigkeiten im Druckbereich und abhängig von seiner Geometrie auch sehr hohe Zugfestigkeiten auf. Die Festigkeit von Glas hängt stark von der Oberflächenbeschaffenheit ab. Mikrorisse und Oberflächendefekte reduzieren die theoretische Festigkeit von über 10.000 N/mm^2 auf Festigkeitswerte im Zugbereich von z.T. unter $f_u = 10 \text{ N/mm}^2$. Die Ursache hierfür liegt in sehr hohen Kerbspannungen, die durch die lineare Elastizität des Werkstoffs schon unter geringen Bauteilbeanspruchungen entstehen. Im Rahmen eines DFG-Forschungsprojektes werden an der TU Dresden umfangreiche Untersuchungen zum Thema Glaskantenfestigkeiten durchgeführt (Werner, et al., 2010). Dabei konnte eine Interaktion zwischen Kantenbearbeitungsgrad und resultierender Kantenfestigkeit nachgewiesen werden. Glasplatten mit geschliffener Kante wiesen konstant hohe Biegezugfestigkeiten auf, bei polierten Glaskanten wiesen die Biegezugfestigkeiten z.T. erhebliche Streuungen auf mit Festigkeitswerten, die teilweise wesentlich unterhalb der Festigkeitswerte für Glaskanten mit geschliffener Kante lagen. Das linear-elastische Materialverhalten hat einen wesentlichen Einfluss auf das Bruchbild, was durch einen glatten, z.T. auch muschelartigen Verlauf gekennzeichnet ist. Duktile Effekte können dabei nicht beobachtet werden. Die Arbeitsaufnahme während des Bruchs ist sehr gering. Abbildung 5.3 zeigt unterschiedliche Bruchbilder von Kalk-Natron-Glas.

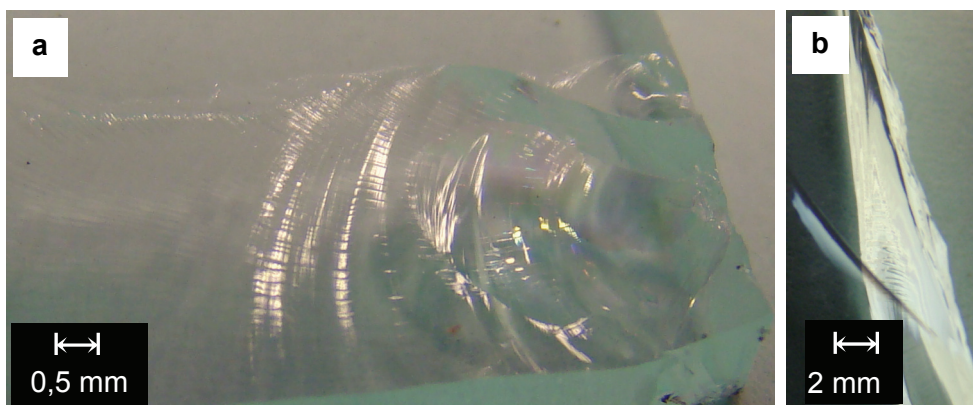


Abbildung 5.3: Bruchfläche von Kalk-Natron-Glas; a: infolge Kantenpressung; b: infolge Biegezugbeanspruchung

Analog zu den optischen Eigenschaften ist bei den mechanischen Eigenschaften der lineare Temperaturdehnungskoeffizient α_T stark von den einzelnen Bestandteilen des Glases abhängig. Quarzglas (SiO₂) weist dabei mit $\alpha_T = 0,2 \times 10^{-6} \times \text{K}^{-1}$ den geringsten Temperaturdehnungskoeffizient auf, gefolgt von Borosilikatglas mit $\alpha_T = 3,25 \times 10^{-6} \times \text{K}^{-1}$. Handelsübliches Fensterglas (Kalk-Natron-Glas) hat einen mit $\alpha_T = 7,6 \times 10^{-6} \times \text{K}^{-1}$ wesentlich höheren Tempe-

raturdehnungskoeffizienten, was ungefähr 50 % des Temperaturdehnungskoeffizienten von Stahl entspricht.

Bei der Klebung an Glasoberflächen, die im Floatglasprozess hergestellt werden, ist es erforderlich die luftseitige Oberfläche des Glases dem Klebprozess zuzuführen. In experimentellen Untersuchungen des Instituts für Oberflächen- und Fertigungstechnik der TU Dresden wurden bei Klebungen auf der Zinnbadseite sehr hohe Streuungen bezüglich der Schubfestigkeiten experimentell ermittelt. Die Streubreiten der Schubfestigkeiten von Klebungen auf der Luftseite des Floatglases waren dagegen wesentlich geringer (Werner, et al., 2010).

Kunststoff

Die Verwendung von Kunststoffen als Tragelement im Bauwesen wird gegenwärtig in umfangreichen Forschungsprojekten an verschiedenen Forschungsstandorten in Deutschland untersucht (Gieler, et al., 2006; Dominginghaus, 2008; Dimmig-Osburg, et al., 2010; AVK, Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, 2010). Für die Verwendung als tragende Elemente relevanten Kunststoffe, wie Polycarbonat (PC) und Polymethylmethacrylat (PMMA), weisen eine hohe Festigkeit von $f_u > 45 \text{ N/mm}^2$ im Zug- und Druckbereich auf und können damit in statisch tragender Funktion eingesetzt werden. Ein weiterer, aus gestalterischer Sicht interessanter Aspekt bei der Verwendung von Kunststoffen ist die Transparenz im sichtbaren Lichtbereich.

Problematisch bei der Anwendung von Kunststoffen sind die geringe Wärmebeständigkeit, der hohe Temperaturdehnungskoeffizient, Kriecheigenschaften bei mechanischer Belastung sowie ausgeprägte Alterungseffekte, die besonders unter UV-Einstrahlung zu beobachten sind. Daher ist es bei Kunststoffen erforderlich, Einsatz- und Randbedingungen klar zu definieren und ggf. den Einsatzraum für den Kunststoff materialgerecht anzupassen.

Die mechanischen Materialeigenschaften von Kunststoffen sind stark temperaturabhängig und werden weitgehend geprägt von deren chemischen Zusammensetzung, der molekularen Vernetzung und dem angewandten Herstellungsverfahren. So ist z. B. bei im Spritzgussverfahren hergestellten Kunststoffbauteilen eine Materialversteifung in der Richtung des Bauteils festzustellen, die während des Spritzvorgangs die Fließrichtung des Kunststoffs darstellte. Das ist auf die molekulare Kettenausrichtung des Kunststoffs zurückzuführen, die durch den Spritzvorgang eine Ausrichtung in Fließrichtung erfährt. Daher sind die mechanischen Materialeigenschaften von in Spritzgusstechnologie hergestellten Kunststoffen als anisotrop zu betrachten. Bei Kunststoffplatten, die nicht im Spritzgussverfahren hergestellt werden, tritt dieser Effekt nicht auf. Die Materialeigenschaften parallel zur Plattenrichtung können als weitgehend isotrop betrachtet werden. Unter mechanischer Kurzzeitbelastung reagieren Kunststoffe zunächst elastisch, bei Überschreiten der Elastizitätsgrenze reagieren sie abhängig von ihrer molekularen Struktur stark voneinander abweichend.

Bei mechanischer Langzeitbelastung weisen Kunststoffe abhängig von ihrer Vernetzungsstruktur ein z.T. stark ausgeprägtes Kriechverhalten auf. Das Kriechverhalten kann in ein zeitabhängiges und ein belastungsabhängiges Kriechverhalten unterteilt werden. Das Kriechverhalten ist stark temperaturabhängig, wobei bei vielen Kunststoffen ein Zusammenhang zwischen dem Kriechverhalten einer langzeitbelasteten Kunststoffprobe bei niedriger Temperatur und dem Kriechverhalten einer kurzzeitbelasteten Probe bei höherer Temperatur hergestellt werden kann. Dieser Zusammenhang wird i. Allg. als thermorheologisch einfaches Werkstoffverhalten beschrieben.

Für die Verwendung von Kunststoffen in strukturell tragenden Bauteilen bedeutet das Kriechverhalten einen Nachteil, sofern der Kunststoff unter statischer Dauerbelastung als

exponiertes Einzelbauteil eingesetzt wird. Die Verwendung von Kunststoffen in Kombination mit anderen nicht kriechnächtigen Werkstoffen, wie z. B. Glas, ermöglicht hingegen Tragwerke, die auch statischen Dauerbelastungen formstabil standhalten.

Die Untersuchung des Kunststoffes erfolgt in einem umfangreichen experimentellen Programm. Dabei wird in einem Kurzzeit-Belastungsversuch an Zugstäben nach DIN EN ISO 527-4 (Deutsches Institut für Normung, 1997) das Last-Verformungs-Verhalten analysiert. Die Nutzung von zweiaxialen DMS (siehe Abbildung 5.4) erlaubt zusätzlich die Bestimmung der Querkontraktions-Zahl und somit die Berechnung des Schub- und Kompressionsmoduls.

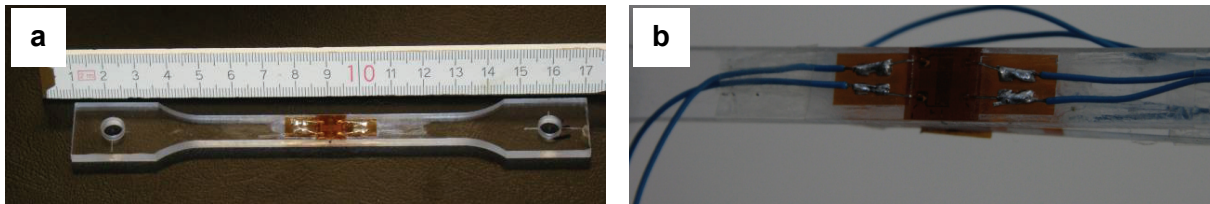


Abbildung 5.4: Versuchskörper für die Durchführung des einaxialen Zugversuchs; a: Zugstab aus PC; b: DMS in Zugstabmitte

Aufgrund der belastungsabhängigen Materialantwort des Kunststoffes werden unterschiedliche Zugbeanspruchungen realisiert. Um Temperatureffekte auszuschließen, erfolgt die Versuchsdurchführung in vollklimatisierter Umgebung bei $\vartheta = 23\text{ °C}$. Abbildung 5.5 zeigt den Versuchsaufbau für Polycarbonat bei einer einaxialen Beanspruchung von $\sigma = 26\text{ N/mm}^2$. Die Auswertung der mittels DMS ermittelten Versuchsdaten (siehe Abbildung 5.6c) weist auf ein ausgeprägtes viskoelastisches Materialverhalten des Polycarbonats bei der gegebenen Beanspruchung unter Raumtemperatur hin.

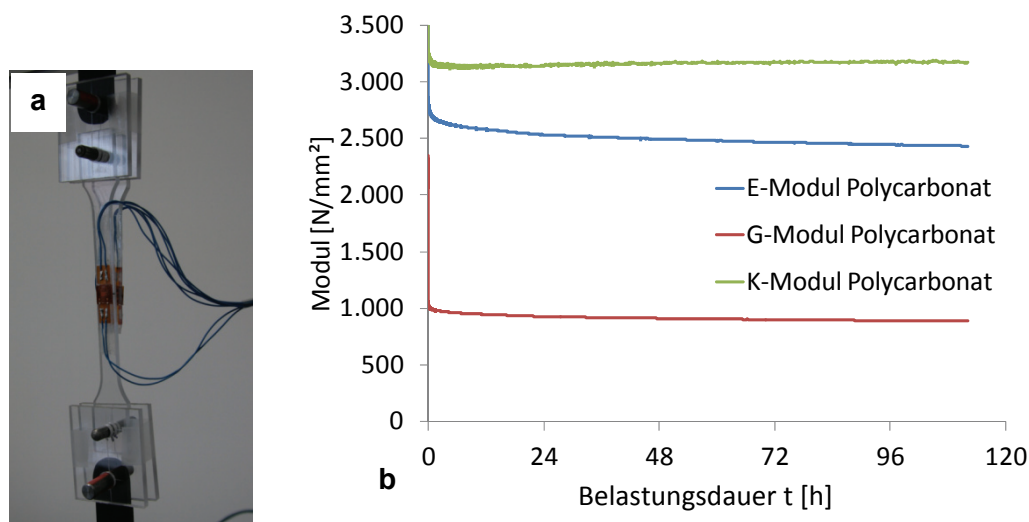


Abbildung 5.5: Bestimmung der mechanischen Materialeigenschaften von Polycarbonat (Makrolon UV 2099) im Kriechversuch; a: Versuchsdurchführung; b: Steifigkeit des Kunststoffes in Abhängigkeit der Belastungsdauer

Die Kenntnis der Materialkennwerte bildet die Basis für eine numerische Analyse des Kunststoffes an komplexen Bauteilen. Dazu werden die experimentell ermittelten Materialparameter in ein numerisch erfassbares Materialmodell umgerechnet. Im vorliegenden Fall findet ein generalisiertes MAXWELL-Element Verwendung (Abbildung 5.6a), um die viskoelastische Reaktion des Polycarbonats in guter Näherung abzubilden.

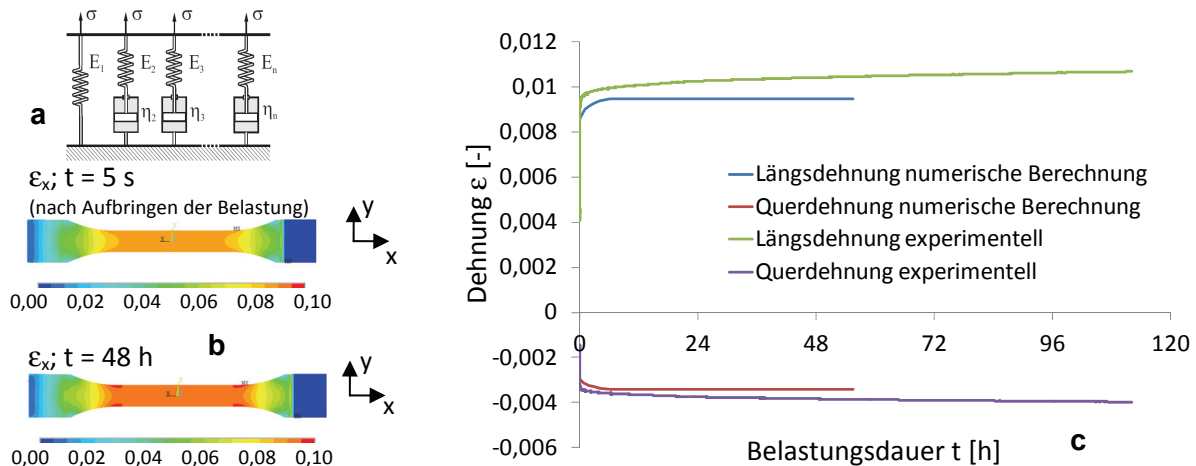


Abbildung 5.6: Ergebnisse der FEM-Analyse des Materialverhaltens von Polycarbonat; a: generalisiertes MAXWELL-Modell; b: berechneter Dehnungsverlauf im Zugstab für unterschiedliche Zeitpunkte; c: experimentell ermittelte Dehnungen und numerisch berechnete Dehnungen über die Zeit

Die Verifizierung des numerisch formulierten Materialmodells erfolgt über einen Vergleich mit den experimentell mittels DMS bestimmten Dehnungen in Längs- und Querrichtung über die Zeit. Der Vergleich zeigt sowohl qualitativ als auch quantitativ eine gute Annäherung der Werte.

5.1.4 Verbundbetrachtung

Die hauptsächlich verwendeten Klebstoffe sind lichtaushärtende Acrylate und Epoxidharzklebstoffe. Diese Klebstoffe zeichnen sich durch hohe Festigkeiten und geringe Kriechneigung aus. Die Eigenschaften der Klebverbindungen werden für verschiedene Klebstoffe experimentell bestimmt. Dazu wird eine Laschenklebung (siehe Abbildung 5.7a) hergestellt und in einem Versuch auf Schub beansprucht. Die während des Versuchs fortlaufend durchgeführte Messung der Kraft und Verschiebung erlaubt eine Analyse der elastischen und plastischen Tragkapazität der Adhäsionsverbindung. Bei der numerischen Untersuchung der Adhäsionsverbindung wird von einer geringen Klebschichtdicke $t < 0,1 \text{ mm}$ ausgegangen. Die Modellierung erfolgt mittels Interface-Elementen, die eine Beschreibung des lokalen Versagens der Adhäsionsverbindung bei Überschreitung eines kombinierten Grenzkriteriums aus Grenzspannung und Grenzverformung ermöglichen. Die Grundlagen dieser numerischen Betrachtung sind in Abschnitt A.1.5 dargestellt.

Die Auswertung der experimentellen Daten eines UV-härtenden Acrylats im Vergleich zu einer numerischen Analyse zeigt Abbildung 5.7b. Die Übereinstimmung der Werte kann in qualitativer und quantitativer Hinsicht als gut bis sehr gut bezeichnet werden.

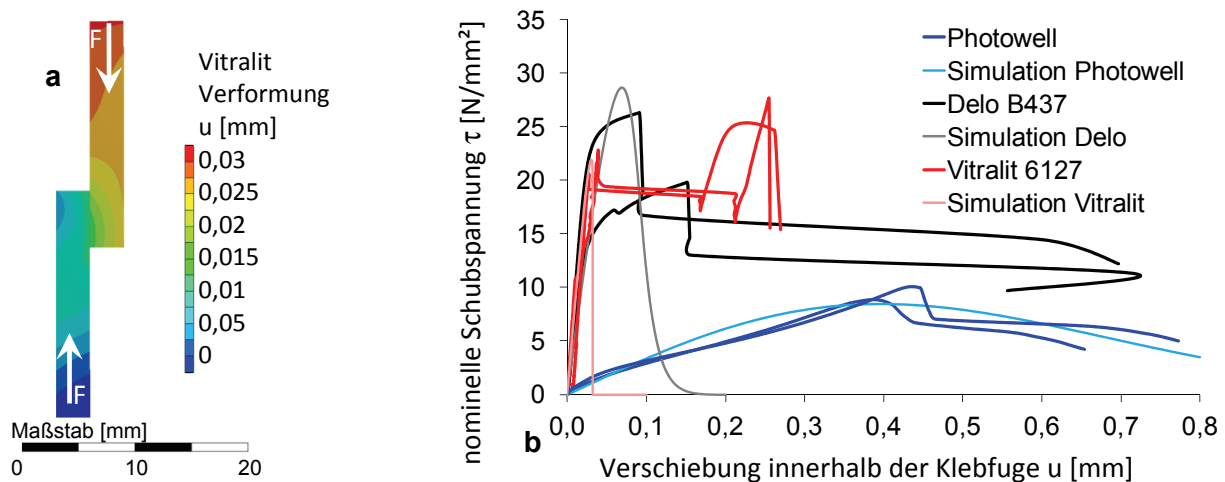


Abbildung 5.7: Ergebnisse der FEM-Analyse der Scherfestigkeit von Klebverbindungen Glas-Glas; a: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus; b: experimentell und numerisch ermittelte Scherfestigkeiten von Klebverbindungen für unterschiedliche Klebstoffe

Die durchgeführten Experimente mit Acrylatklebstoffen verdeutlichen die Bandbreite der mechanischen Eigenschaften verschiedener Klebstoffe, die Verbindungen von hochfest spröde bis zu duktil und mittelfest ermöglichen. Die Implementierung der Klebschichteigenschaften in numerische Modelle gestattet aussagefähige Analysen des Tragverhaltens geklebter Hybridbauteile. Dies stellt eine wesentliche Hilfestellung bei der Auswahl eines für die spezifische Problemstellung optimalen Klebsystems dar.

5.2 Untersuchung ausgewählter Glas-Kunststoff-Hybridelemente

Das Tragverhalten ausgewählter und in ihrer Grundform stahlbautypischer Glas-Kunststoff-Hybridelemente wird in den folgenden Abschnitten 5.2.1 und 5.2.3 diskutiert. Dabei werden unterschiedliche Konstruktionsformen numerisch und experimentell analysiert. Die Analysen erstrecken sich auf Untersuchung des Kurz- und Langzeit-Tragverhaltens von Einfeldträgern in Glas-Kunststoff-Hybridbauweise, der Betrachtung von transparenten Verbindungselementen und einer Langzeiterprobung einer vollständig transparenten Kuppelkonstruktion.

5.2.1 Doppelsymmetrische Querschnittsformen

Mit Hinblick auf eine Optimierung der Querschnitte wurde versucht, praxismgerechte Tragquerschnitte herzustellen. Dabei waren insbesondere das Verhältnis von Steg- zu Gurtflächen sowie die Verbindung zwischen Steg und Gurt zu optimieren. Die Versuchsserie umfasste 22 Träger mit zwei verschiedenen Querschnitten (Abbildung 5.8).

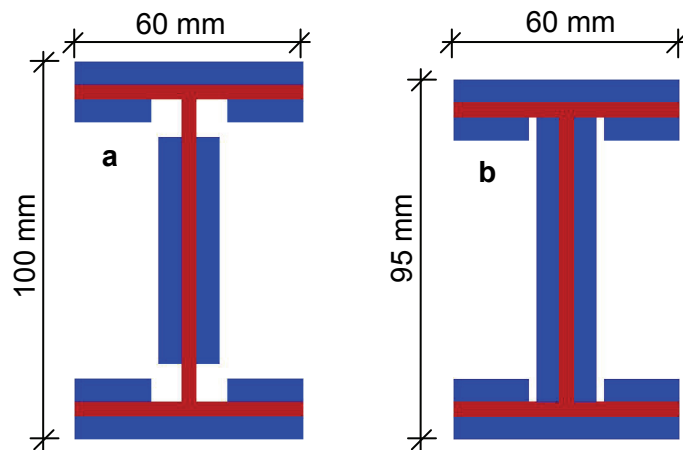


Abbildung 5.8: Varianten eines Hybridträgers; a: Querschnitt A; b: Querschnitt B

Die unterschiedlichen Höhen der Träger ergaben sich durch die Forderung, dass beide Querschnitte gleich große Trägheitsmomente unter Berücksichtigung von Glas und Kunststoff aufweisen sollten, um den Einfluss der Verbindung zwischen Steg und Gurt auf das Tragverhalten zu untersuchen.

Die Beanspruchung erfolgte als Vier-Punkt-Biegeträger-System, um über eine definierte Strecke einen möglichst konstanten Beanspruchungszustand im ungerissenen Zustand zu erreichen (Abbildung 5.9).

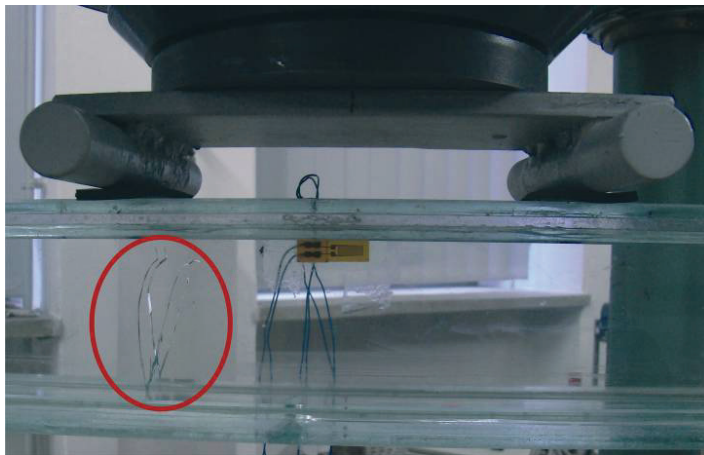


Abbildung 5.9: Träger im Vier-Punkt-Biegeversuch mit Riss im Glas-Stegelement

Es zeigte sich, dass in allen Fällen erste Spontanbrüche an den zugbeanspruchten Rändern der Glas-Stegelemente auftreten (Abbildung 5.9). Die Höhe der Beanspruchung vor dem Bruch liegt in den erwarteten Größenordnungen. Ein Initialbruch der Glaselemente an den Gurten lässt sich nur in seltenen Fällen erreichen. Risse in den zugbeanspruchten Glas-Gurtelementen treten erst bei deutlicher Steigerung der Lasten auf. Damit kann die ingenieurmäßig idealisierte Betrachtung eines ebenen Querschnitts, insbesondere beim Typ A, aus den Versuchen unter hoher Querkraftbeanspruchung nicht bestätigt werden. Die Elastizität des Kunststoffs führt zu einem nichtlinearen Dehnungsverlauf über die Höhe des momentbeanspruchten Hybridquerschnitts. Weiterhin zeigten die Versuche, dass der Träger mit dem Querschnitt B eine wesentlich höhere Maximaltraglast und eine größere Steifigkeit als der Träger mit dem Querschnitt A aufweist. Die Verbindung des Stegglases an den Gurtkunststoff trägt wesentlich zur Schubübertragung und somit zur Verbesserung des Tragverhaltens bei.

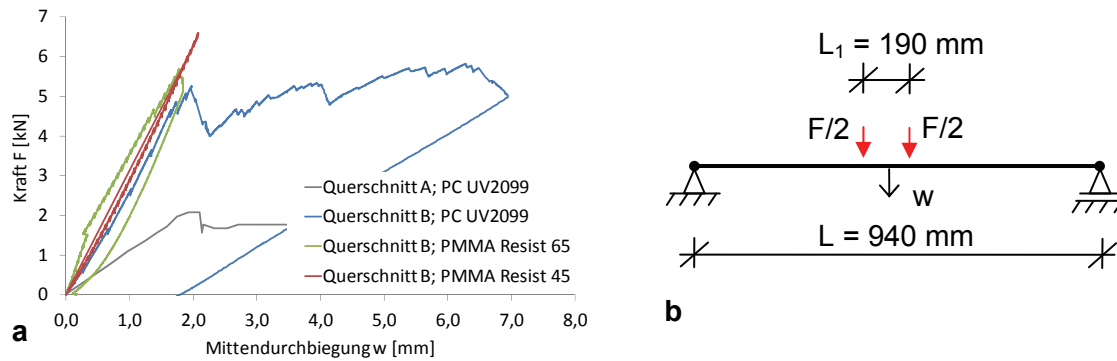


Abbildung 5.10: a: Last-Verformungs-Kurven eines Hybridträgers im Vier-Punkt-Biegeversuch – Kurzzeituntersuchungen; b: statisches System

In numerischen, mit der Methode der FEM geführten Betrachtungen kann für die unterschiedlichen Querschnittsgeometrien A und B gezeigt werden, dass das Tragverhalten des Hybridelementes wesentlich durch die Anschlussausbildung zwischen Steg und Gurt beeinflusst wird. Wesentliche, der numerischen Betrachtung zugrunde liegende Materialkennwerte sind:

- Glas: isotrop elastisch, $t = 4 \text{ mm}$; $E = 70.000 \text{ N/mm}^2$; $\mu = 0,3$,
- Kunststoff: isotrop elastisch, $t = 4 \text{ mm}$; $E = 2.400 \text{ N/mm}^2$; $\mu = 0,42$
- Klebverbindung: $t < 0,1 \text{ mm}$, als Dünnschichtklebung mit einem hochsteifen Acrylat nicht betrachtet, Elementknoten im Bereich der Zwischenschicht Glas-Kunststoff werden verschmolzen

Die Ausführung der Querschnittsgeometrie B zeigt einen dem Lastreaktionsverhalten eines ebenen Querschnitts zumindest ähnlichen Charakter. Damit wird die statische Nutzung der Gurtquerschnitte ermöglicht, wohingegen bei der Querschnittsgeometrie A die statische Ausnutzung der Gurtelemente hinter der Ausnutzung der Stegelemente zurückbleibt. Der Verlauf von Dehnung und Spannung eines biegebeanspruchten Glas-Kunststoff-Hybridelementes ist für eine Momentbeanspruchung $M_y = 1 \text{ kNm}$ für die Querschnittstypen A und B in Abbildung 5.11 dargestellt. Bei Querschnittstyp A ist ein signifikanter Unterschied zwischen dem ingenieurmäßig und dem mit FEM berechneten Dehnungsverlauf zu erkennen.

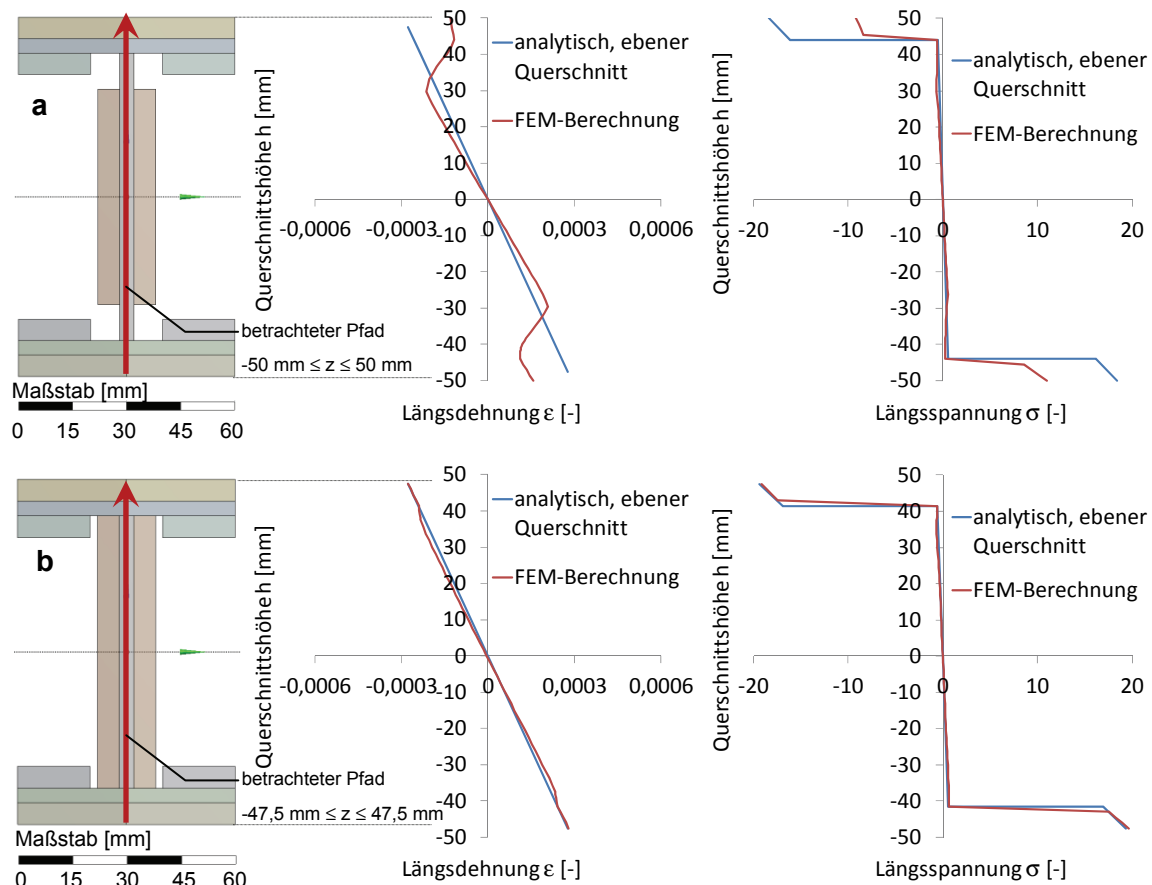


Abbildung 5.11: Dehnungs- und Spannungsverlauf eines Glas-Kunststoff-Hybridelementes mit Lastsituation nach Abbildung 5.10b; $M_y = 1 \text{ kNm}$; a: Typ A; b: Typ B

Bei den Betrachtungen an Querschnittstyp B sind die Unterschiede zwischen den analytisch und den numerisch ermittelten Dehnungen und Spannungen gering. Die mechanische Kopplung zwischen dem Hybridelementsteg und -gurt ist relativ steif.

In den Versuchen zum Kurzzeittragverhalten konnte festgestellt werden, dass der Kunststoff eine hohe Schlagzähigkeit besitzen muss, um die frei werdende Energie, die beim Bruch des Stegglases in Millisekunden auftritt, aufzunehmen. Es zeigte sich, dass der Kunststoff Polycarbonat sehr gut geeignet ist, um die schlagartige Lastumlagerung zu ertragen und weiterhin eine hohe Tragfähigkeit aufzuweisen. Die Größe der Ablösungen zwischen Glas und Kunststoff um den Riss war abhängig vom Klebstoff. In diesem Bereich konnte aufgrund der fehlenden Verbundwirkung keine Kraftübertragung mehr erfolgen. Dennoch bleiben in allen Kurz- und Langzeituntersuchungen die gebrochenen Glaselemente am Kunststoff haften.

Wichtig ist die Feststellung, dass eine relativ hohe Resttragfähigkeit der Träger vorhanden ist. Nach dem Bruch ist zwar ein Steifigkeitsabfall zu beobachten (Abbildung 5.10), die Last lässt sich jedoch wieder steigern und über einen längeren Zeitraum halten. Wird die Last nach dem ersten Bruch reduziert, können relativ hohe Beanspruchungen über einen sehr langen Zeitraum aufgebracht werden. Abbildung 5.12 zeigt die Durchbiegung unterschiedlicher Glas-Kunststoff-Hybridelemente, die im gebrochenen Zustand II weiter mit einer statischen Last beansprucht wurden.

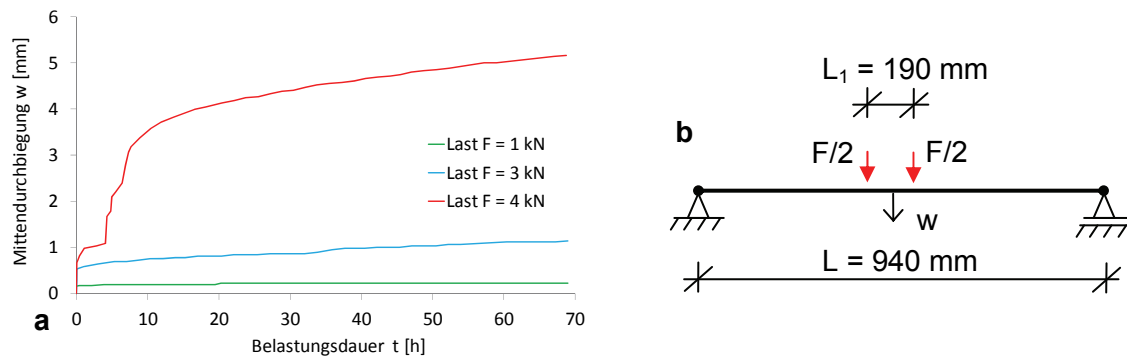


Abbildung 5.12: a: Last-Verformungs-Kurven eines beschädigten Hybridträgers vom Querschnittstyp B im Vier-Punkt-Biegeversuch – Langzeituntersuchungen; b: Statisches System

5.2.2 Lösbare und unlösbare Verbindungselemente

Für die Herstellung transparenter Tragstrukturen ist die Ausbildung lastübertragender Verbindungsbereiche von besonderer Bedeutung. Bestimmt durch das Anforderungsprofil, das an die Konstruktion gestellt wird, kommen dafür lösbare Montageverbindungen oder unlösbare Klebverbindungen in Betracht. Das Tragverhalten derartiger Verbindungen wird an jeweils einer lösbaren bzw. unlösbaren Eckverbindung aus Glas-Kunststoff-Hybridelementen numerisch und experimentell untersucht. Der mechanisch redundante Charakter des Glas-Kunststoff-Hybridelementes muss auch im Bereich der Bauteilverbindung erhalten bleiben (Werner, et al., 2010). Die unlösbare Verbindung wird durch eine geklebte Rahmenecke realisiert. Als lösbare Montageverbindung wird eine Rahmenecke mit wasserstrahlgeschnittenen Formteilen und lösbaren Bolzenverbindungen untersucht. Es werden folgende Ausgangsmaterialien verwendet:

- Glas: Kalk-Natron-Glas $t = 4$ mm, hergestellt im Float Verfahren,
- Kunststoff: Polycarbonat, PC UV2099, $t = 4$ mm
- Klebfuge: Acrylat, Photowell 1012, $t < 0,1$ mm.

Die in der numerischen Betrachtung der Verbindungselemente werden die im vorigen Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Materialkennwerte verwendet. Abbildung 5.13 zeigt die Ergebnisse der numerischen und experimentellen Untersuchung einer lösbaren Montageverbindung von Glas-Kunststoff-Hybridelementen. Der Vergleich zwischen den während der Belastungsuntersuchung spannungsoptisch gemessenen Gangunterschieden und den mittels FEM ermittelten Vergleichsspannungen zeigt qualitativ gute Übereinstimmungen. Eine quantitative Ermittlung vorhandener Spannungen mittels des spannungsoptischen Verfahrens ist aufgrund des integrierenden Messverfahrens über den mehrschichtigen Aufbau des Hybridelementes nicht möglich.

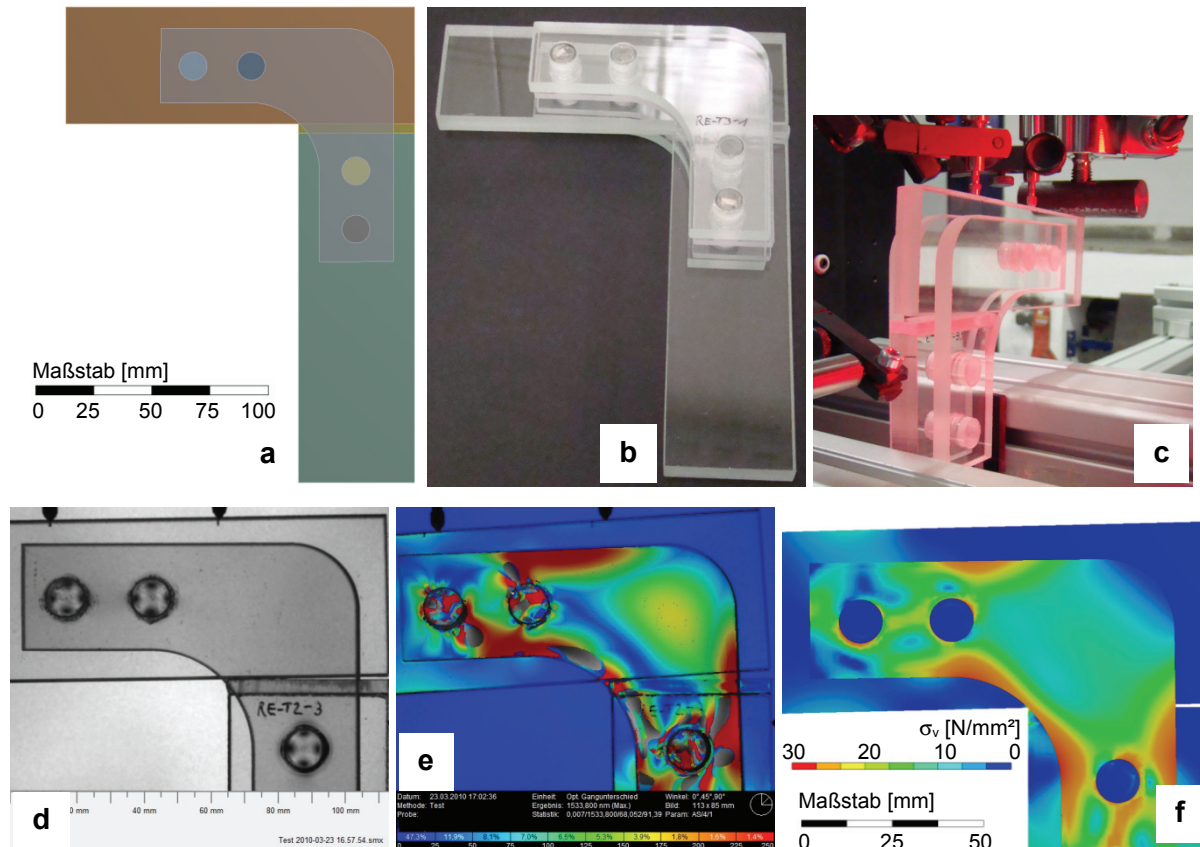


Abbildung 5.13: Untersuchung einer lösbaren Montageverbindung aus Glas-Kunststoff-Hybridelementen; a: geometrisches Modell der FEM Analyse; b: Versuchskörper im Ausgangszustand; c: Eckverbindung während des Belastungsversuchs; d: Ansichtsbereich der spannungsoptischen Analyse; e: gemessene Gangunterschiede bei einem Eckmoment $M = 45 \text{ Nm}$; f: mittels FEM ermittelte Vergleichsspannungen im Bereich der Rahmenecke bei einem Eckmoment $M = 45 \text{ Nm}$

Bedingt durch den Fertigungsprozess des Wasserstrahlschneidens der Löcher im Glas-Kunststoff-Hybridelement weist die geschnittene Glaskante eine hohe Rauheit auf. Dadurch ist die Glaskantenfestigkeit sehr gering. In der Folge treten auch bei niedrigen Beanspruchungen Risse im Lochleibungsbereich der Glaselemente auf, die sich mit zunehmender Momentbeanspruchung zyklisch schlagartig vergrößern.

Abbildung 5.14 zeigt die Ergebnisse der numerischen und experimentellen Untersuchung einer mittels Klebverbindung hergestellten, unlösbaren Rahmenecke. Die numerische Analyse der innerhalb der Klebverbindung auftretenden Schubbeanspruchung im Bereich der Rahmenecke zeigt eine ausgeprägte Konzentration im Kehlbereich der Verbindung. In den experimentellen Untersuchungen wurden in diesem Bereich Ablösungen zwischen der Kunststoff- und Glasscheibe festgestellt, die sich bei fortschreitender Belastung stetig vergrößern. Bei Auftreten eines Initialrisses im Bereich der höchsten mechanischen Kerbbeanspruchung wächst die Klebflächendelamination, wie in Abschnitt 5.1.4 beschrieben, mit Zunahme des Eckmomentes weiter an. Damit kann eine gute qualitative Übereinstimmung zwischen experimentell und numerisch ermittelten Trageigenschaften der Eckverbindung festgestellt werden.

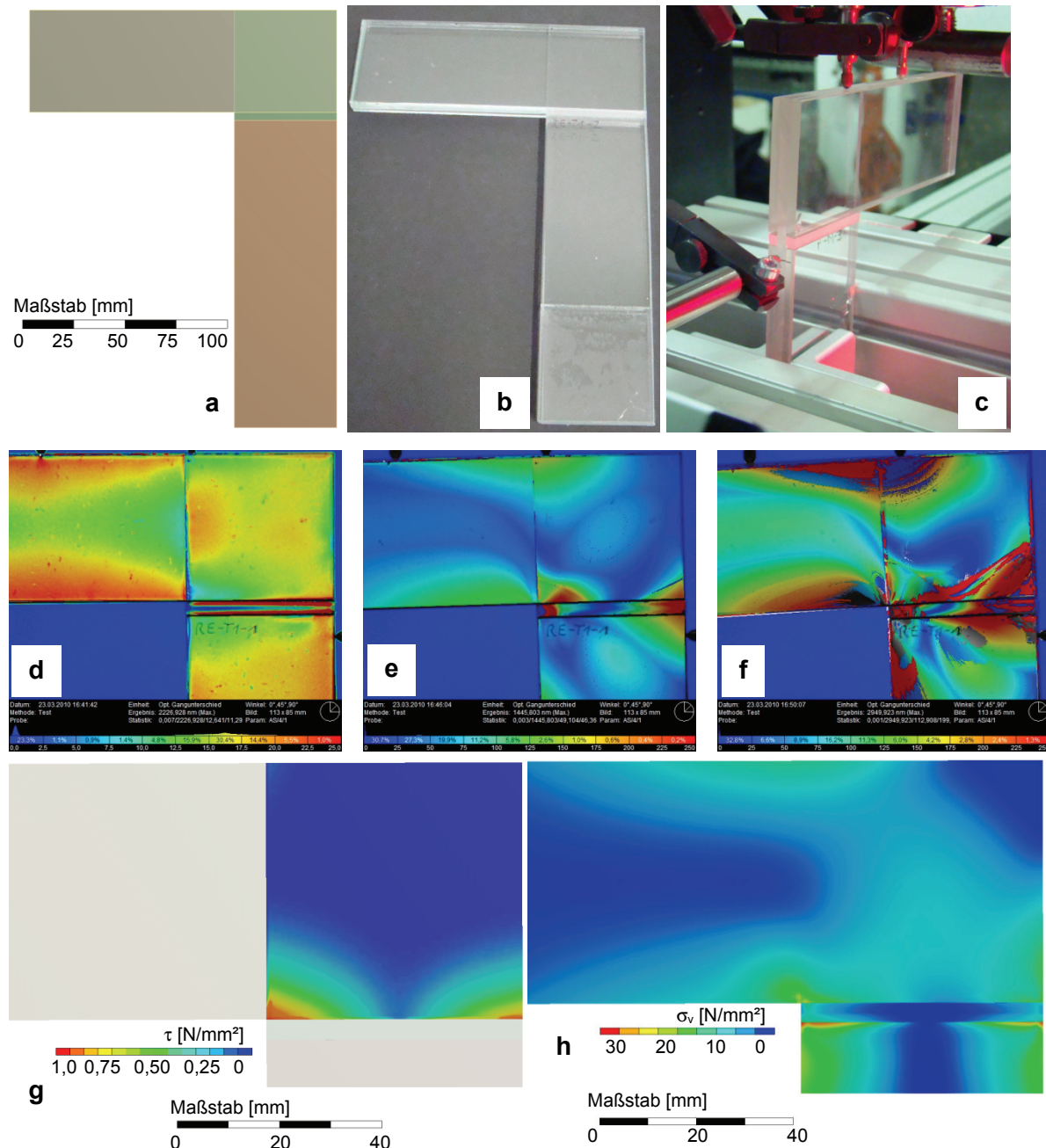


Abbildung 5.14: Untersuchung einer geklebten unlösbaren Eckverbindung mit Glas-Kunststoff-Hybridelementen; a: geometrisches Modell der FEM Analyse; b: Versuchskörper im Ausgangszustand; c: Eckverbindung während des Belastungsversuches; d: optischer Gangunterschied infolge der Klebeigenspannungen innerhalb der Eckverbindung; e: gemessene Gangunterschiede bei einem Eckmoment $M = 45 \text{ Nm}$; f: gemessene Gangunterschiede bei einem Eckmoment $M = 105 \text{ Nm}$; g: mittels FEM ermittelte Schubspannungen im Bereich der Klebverbindung bei einem Eckmoment $M = 45 \text{ Nm}$; h: mittels FEM ermittelte Vergleichsspannungen im Bereich der Eckverbindung bei einem Eckmoment $M = 45 \text{ Nm}$

Die numerisch und experimentell ermittelten Eckmoment-Verformungs-Kurven sind in Abbildung 5.15 dargestellt. Die lösbare Eckverbindung weist ein wesentlich weiches Moment-Verformungs-Verhalten auf als die flächig im Eckbereich geklebte Verbindung. Die Steifigkeitsunterschiede der verschiedenartigen Verbindungsformen sind in den unterschiedlich

langen Lastpfaden begründet, die bei der Übertragung der Eckbeanspruchung aktiviert werden.

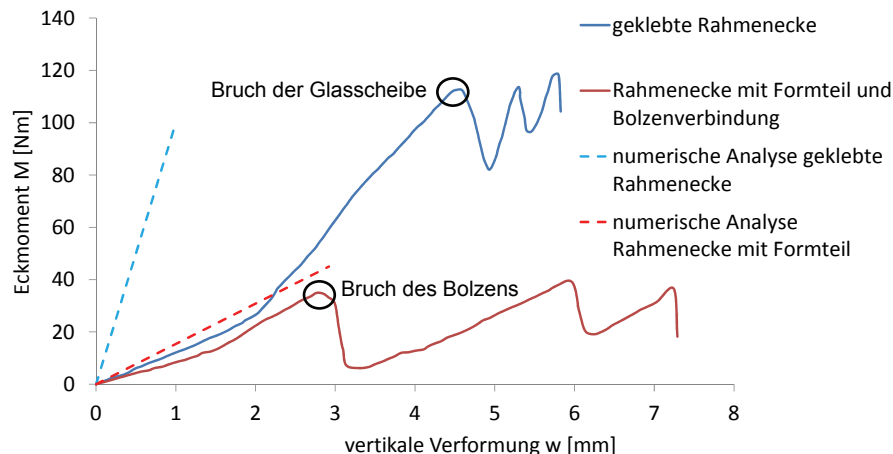


Abbildung 5.15: Eckmoment-Verformungs-Kurven von zwei unterschiedlichen Verbindungsvarianten (Werner, et al., 2010)

Die Unterschiede zwischen numerisch und experimentell ermittelten Eckmoment-Verformungs-Kurven sind bei der geklebten Eckverbindungsvariante relativ groß. Das ist durch die experimentell bedingte weiche Auflagerausbildung zu begründen, die im numerischen Modell eine unendliche Steifigkeit aufweist. Bei der Rahmenecke mit Formteil und Bolzenverbindung sind die Unterschiede zwischen numerischer und experimenteller Analyse des Eckmoment-Verformungs-Verlaufes relativ gering, allerdings liegt auch hier eine geringere experimentell ermittelte Steifigkeit gegenüber der numerisch analysierten Eckverbindung vor.

Der Vergleich zwischen den unterschiedlichen Fertigungsverfahren, lösbare Rahmenecke mit Bolzenverbindung und unlösbare Rahmenecke mit einer Klebverbindung, zeigt, dass die Steifigkeit und Tragfähigkeit der geklebten Eckverbindung höher als die der Rahmenecke mit Formteil und Bolzenverbindung ist.

5.2.3 Experimentalbauten unter Langzeiterprobung

Im Rahmen der experimentellen Untersuchung des Langzeitverhaltens von Glas-Kunststoff-Hybridelementen wurden spezielle hybride Konstruktionen hergestellt und der Bewetterung ausgesetzt. Abbildung 5.16 zeigt eine Treppenkonstruktion in Glas-Kunststoff-Metall-Hybridbauweise und verschiedene Stadien deren Herstellung. Die Ausbildung der Treppenhängen erfolgte für eine Seite in Glas-Kunststoff-Hybridbauweise und für die andere Seite in Form eines doppelsymmetrisch geschweißten Stahlprofils. Damit können die Unterschiede der verschiedenen Bauweisen in gestalterischer Hinsicht verdeutlicht werden. Die Treppenkonstruktion befindet sich seit dem Jahr 2005 unter verschiedenartigen Randbedingungen in experimenteller Erprobung. Dabei wurden unterschiedliche Belastungsversuche durchgeführt und Auswirkungen der Freibewetterung im Sommer und Winter untersucht. Um Veränderungen an der Konstruktion feststellen zu können, wurde im Untergurt der Glas-Kunststoff-Hybrid-Treppenhänge ein DMS zur Messung der Längsdehnungen des Trägers installiert. Durch Messungen der belastungsabhängigen Dehnungen, die im Zeitraum der experimentellen Erprobungen in den vergangenen sieben Jahren zyklisch durchgeführt wurden, konnten bisher keine Veränderungen der Trageigenschaften des Glas-Kunststoff-Hybridelementes festgestellt werden (Hildebrand, et al., 2008; Göbel, et al., 2009).

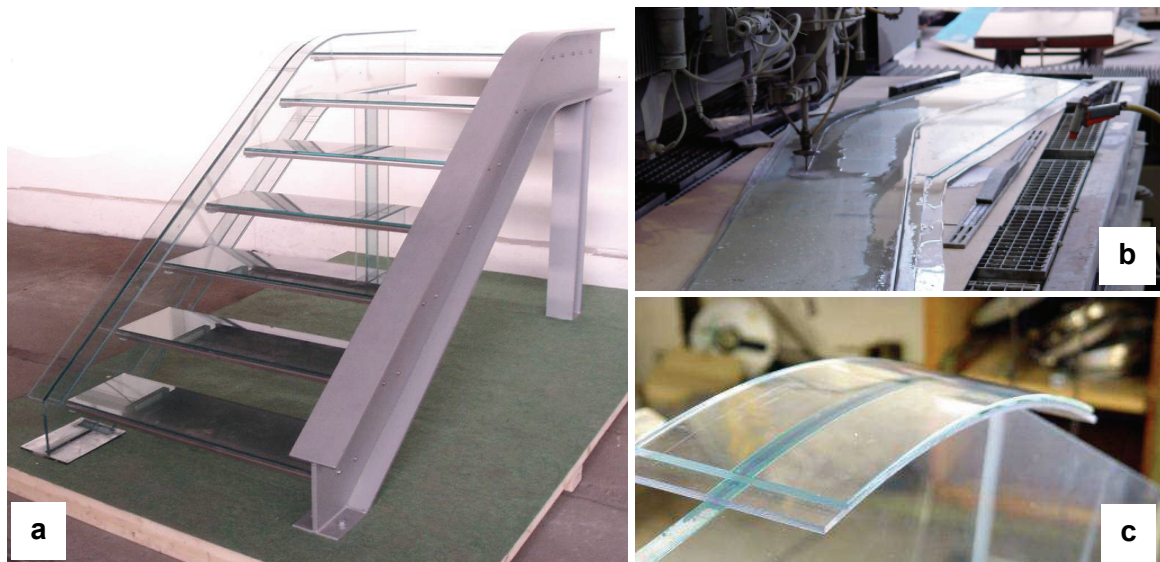


Abbildung 5.16: Experimentalbau einer transparenten Treppenkonstruktion mit Glas-Kunststoff-Hybridelementen (Hildebrand, 2008); a: Treppenkonstruktion nach Fertigstellung; b: Wasserstrahlschneiden der Glas-Kunststoff-Wange; c: Aufkleben der gekrümmten Glas-Kunststoff-Gurten zur Herstellung eines doppelsymmetrischen Wangenprofils

Der Experimentalbau einer Kuppelkonstruktion in Glas-Kunststoff-Hybridbauweise soll Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Glas-Kunststoff-Hybridbauweise unter ständiger Freibewitterung ermöglichen. Abbildung 5.17 und Abbildung 5.18 zeigen die Konstruktion der Kuppel und deren wesentlichen Detaillösungen. Die Tragkonstruktion der Kuppel mit einem Durchmesser $d = 2.300 \text{ mm}$ und der Höhe $h = 910 \text{ mm}$ besteht aus zwölf zusammengesetzten Rippen in Glas-Kunststoff-Hybridbauweise, die in einem zentralen, aus Polycarbonat gefertigten Verbindungspunkt miteinander gekoppelt werden.

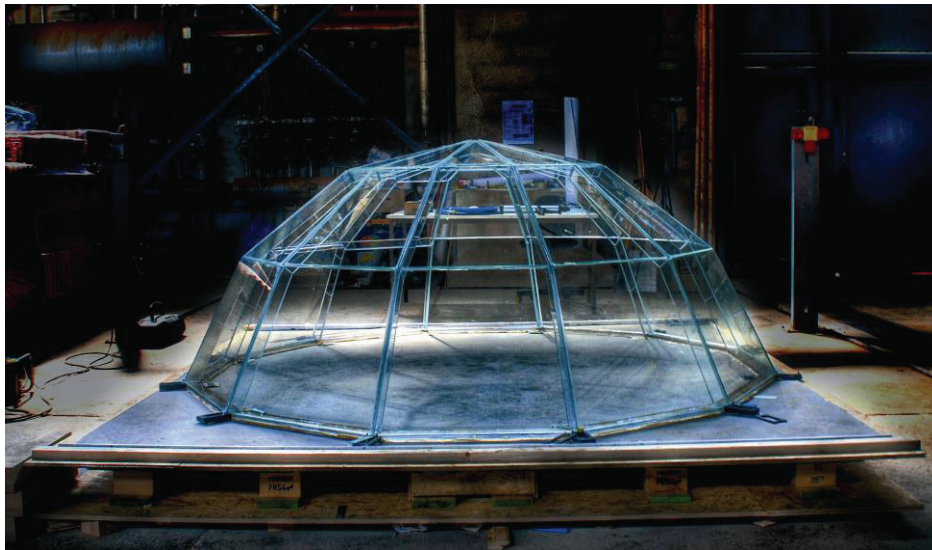


Abbildung 5.17: Experimentalbau einer transparenten Kuppelkonstruktion mit Glas-Kunststoff-Hybridelementen (Hildebrand, 2008)

Der für die Sicherheitsbetrachtungen notwendige, redundante Charakter der Tragkonstruktion wird durch die Kombination aus einer vielfachen Unbestimmtheit des statischen Systems und durch die allseitige Anordnung von Glas-Kunststoff-Hybridelementen sichergestellt. Die Transparenz der Kuppelkonstruktion wird dabei an keiner Stelle beeinträchtigt, da auf opake

lokale Verbindungsmittel infolge der Anwendung flächiger transparenter Klebverbindungen verzichtet werden konnte.

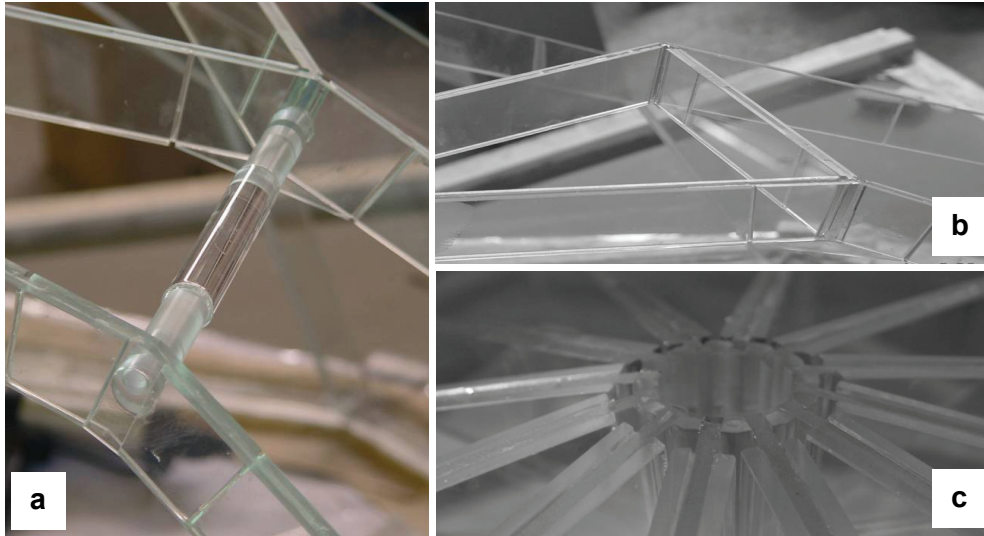


Abbildung 5.18: Detailausbildungen der Kuppelkonstruktion in Glas-Kunststoff-Hybridbauweise (Hildebrand, 2008); a: lösbares Rippenverbindungsdetail mit einem Gewindestab aus Polycarbonat; b: unlösbar geklebtes Rippenverbindungsdetail; c: zentrales Rippenverbindungsdetail im Kuppelscheitel, hergestellt aus Polycarbonat

Die Kuppelkonstruktion wird seit dem Jahr 2008 der Freibewetterung ausgesetzt. Dabei treten verschiedenartige klimatisch bedingte Lastzustände auf, die insbesondere für die Dauerhaftigkeit der Klebverbindungen Relevanz besitzen. Abbildung 5.19 zeigt die schneebedeckte Kuppelkonstruktion im Winter.



Abbildung 5.19: Freibewetterung der Kuppelkonstruktion (Hildebrand, 2008)

Im Rahmen der Langzeituntersuchungen sollen die Folgen der Freibewitterung auf die Klebverbindung zwischen Glas und Kunststoff untersucht werden. Die für die Klebfuge wesentlichen Einwirkungen bestehen dabei aus:

- Wasserangriff,
- Temperaturwechselbeanspruchung und
- UV Beanspruchungen.

Im Rahmen des bisher vierjährigen Untersuchungszeitraums wurden keine wesentlichen Veränderungen der optischen Eigenschaften oder mechanische Beschädigungen an der Kuppelkonstruktion festgestellt. Damit ist nach bisherigen Erkenntnissen der Einsatz von Glas-Kunststoff-Hybridelementen unter den Bedingungen der Freibewitterung möglich. Für eine Abschätzung der Dauerhaftigkeit dieser Systeme unter verschiedenartigen Randbedingungen ist es notwendig, die Bewitterungsversuche fortzuführen, um eine größere Einwirkungsdauer zu erfassen.

5.3 Herstellungsaspekte und Anwendung

Die Herstellung und Anwendung von Glas-Kunststoff-Hybridelementen wird durch verschiedenartige Faktoren beeinflusst. In den folgenden Abschnitten 5.3.1 und 5.3.2 werden Herstellungskonzepte für die Produktion von Glas-Kunststoff-Hybridelementen diskutiert, sowie Möglichkeiten der Anwendung transparenter Tragstrukturen vorgestellt.

5.3.1 Randbedingungen der Klebverbindung

Für die Herstellung von Glas-Kunststoff-Hybridelementen werden hauptsächlich UV- bzw. lichtaushärtende Acrylatklebstoffe verwendet. Die Belichtung des Klebstoffs ist dann Voraussetzung für dessen Aushärtung. Aufgrund der starken UV-Absorption des Kunststoffes sollte die Belichtung einer Glas-Kunststoff-Klebfläche immer von der Glasseite aus erfolgen.

Die Schubfestigkeit der Klebverbindung zwischen Glas und Kunststoff ist bei den verwendeten Float-Glasscheiben von der Glasoberfläche abhängig. Die während des Herstellungsprozesses auf dem Zinnbad fließende Oberfläche weist aufgrund der gebundenen Zinnanteile eine geringere Schubfestigkeit auf als die luftseitige Glasoberfläche. Daher ist beim Herstellungsprozess eines Glas-Kunststoff-Elementes die luftseitige Glasoberfläche als Klebfläche zu verwenden.

Das gleichmäßige Ablaufen des Aushärtvorgangs hat einen wesentlichen Einfluss auf die optische und mechanische Qualität der Klebverbindung. Eine ungleichmäßige Aushärtgeschwindigkeit führt zur Ausbildung lokaler Klebfehler, die den transparenten Charakter der Klebverbindung beeinträchtigen. Die lokalen Diskontinuitäten einer transparenten Glas-Kunststoff-Klebverbindung können mittels spannungsoptischer Analyse sichtbar gemacht werden. Abbildung 5.20 zeigt den gemessenen Gangunterschied für unterschiedliche Klebverbindungen bei gleicher Skalierung.

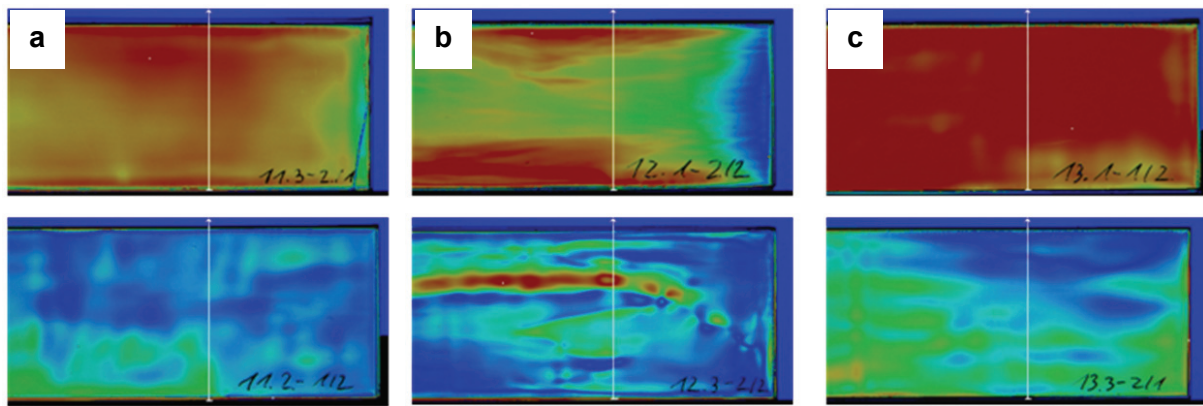


Abbildung 5.20: Beispiele für Klebstoffeigenspannungen infolge gleichmäßiger und ungleichmäßiger Aushärtung (Werner, et al., 2010); a: DELO PB 4442; b: Vitalit 6127; c: Photowell 1012; oben: Klebstoffeigenspannungen infolge gleichmäßiger Aushärtung; unten: Klebstoffeigenspannungen infolge ungleichmäßiger Aushärtung

Das Kleben großflächiger Glas-Kunststoff-Elemente erfordert eine flächenförmige Belichtungseinheit, mit der sichergestellt werden kann, dass die Aushärtung der gesamten Klebfläche gleichmäßig in einem Arbeitsschritt erfolgen kann.

5.3.2 Parameter der Anwendung

Im Bereich der Ganzglaskonstruktionen ist es das Ziel, zu zeigen, dass tragende Glaskonstruktionen mit Verzicht auf jegliche Trag- und Verbindungselemente aus Metallen, die Transparenz und Dauerhaftigkeit der Konstruktionen einschränken, realisierbar sind. Eine in Abbildung 5.21 dargestellte zweigeschossige Vollglaskonstruktion lieferte wesentliche Erkenntnisse zum Tragverhalten von Stützen-Riegel-Konstruktionen im Zusammenwirken mit Wand- und Deckenscheiben (Werner, 2004). Die Problematik der Verklebung mehrerer tragender Elemente mittels einer Naht aus Silikon-Klebstoff ließ sich am Objekt in technischer Sicht bearbeiten und im Langzeitversuch hinsichtlich Dauerhaftigkeit studieren.

Die Untersuchungen verdeutlichen auch den dringenden Bedarf an konstruktiv optimalen Querschnitten, wie z. B. T- oder Doppel-T, um effektive Tragkonstruktionen mit minimalen Abmessungen realisieren zu können. Eine weitere Erkenntnis bezieht sich auf die Möglichkeiten des Fügens von Wand- und Tragelementen, die bisher sowohl eine statische als auch gestalterische Schwachstelle darstellen, da die verwendeten Werkstoffe die Transparenz deutlich stören oder lokale Beanspruchungen (metallische Sicherungselemente) hervorrufen.

Ausgehend von diesen Erfahrungen werden grundlegende Untersuchungen zur Möglichkeit der Gestaltung von Glas-Kunststoff-Hybridverbindungen geplant und an den in Abbildung 5.21b dargestellten Versuchskörpern realisiert (Werner, 2004).

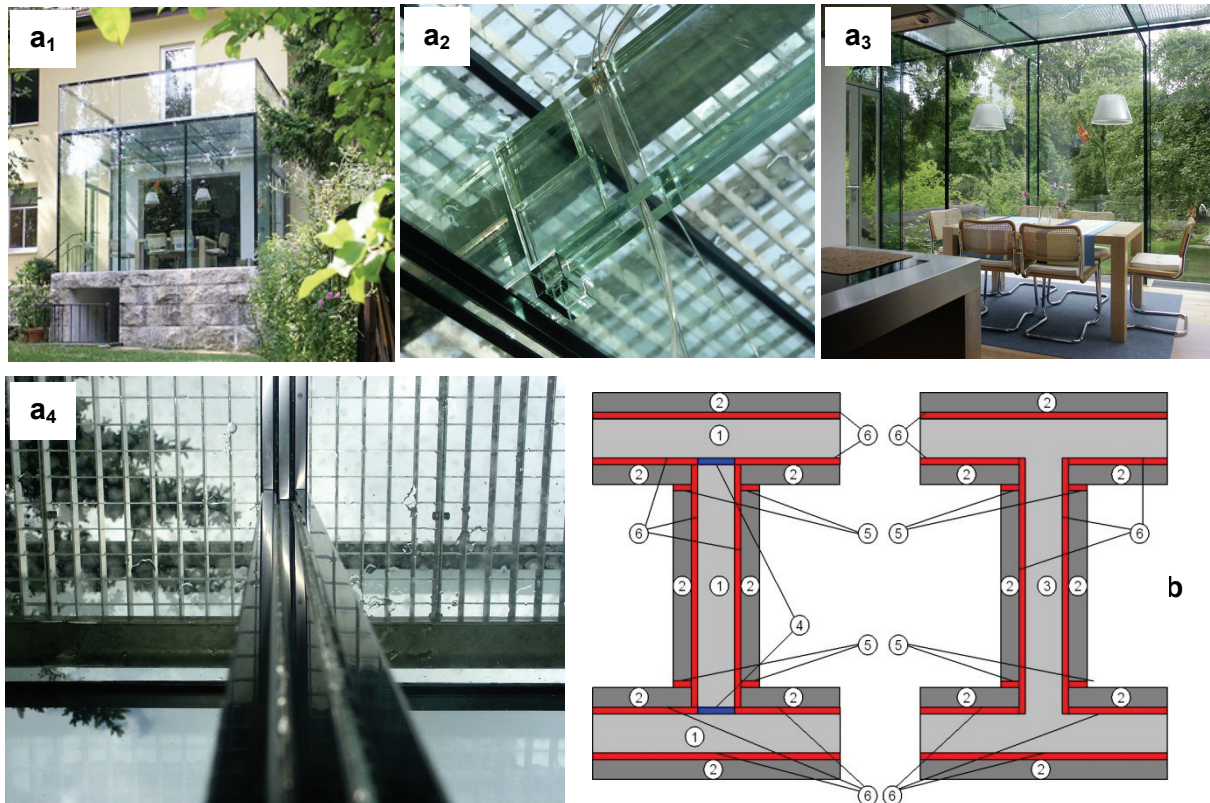


Abbildung 5.21: a_{1...4}: Ganzglaskonstruktion eines Wintergartens; Einsatz von Glas-Kunststoff-Hybridelementen als tragende Bauelemente; b: Querschnittsaufbau von Hybridelementen; 1- Kunststoffscheiben; 2 – Glasscheiben; 3 – Kunststoffprofil 4 - Verbindung zwischen Kunststoffscheiben; 5 - Verbindung zwischen Glasscheiben; 6 - Verbindung zwischen Glas- u. Kunststoffscheiben (Werner, 2004)

Die Herstellung dauerhafter und robuster Bauwerke, die eine praktische Anwendung erfahren sollen, erfordert allerdings noch umfangreiche Untersuchungen auf dem Gebiet der Materialien, deren Verbindungen und der Bauelemente.

Transparente Glaskonstruktionen werden in immer größerem Umfang und unter Nutzung modernster Tragsysteme im Bauwesen eingesetzt. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass tragende Glas-Kunststoff-Hybridelemente möglich und für die Herstellung des Verbundes zwischen Glas und Kunststoff geeignete Klebstoffe sowie Oberflächenvorbehandlungen auf dem Markt vorhanden sind.

5.4 Bemessungskonzept

Die Bemessung von Glas-Kunststoff-Hybridsystemen für den bautechnischen Einsatz erfolgt derzeit über das Verfahren der bauaufsichtlichen Zustimmung im Einzelfall. Für einen breiten Einsatz solcher Hybridsysteme ist es erforderlich, ein weitgehend allgemein gehaltenes Bemessungskonzept zu entwickeln. In den folgenden Abschnitten 5.4.1 und 5.4.2 werden Sicherheitsbetrachtungen und Bemessungsansätze diskutiert, die aus den vorangegangenen numerischen und experimentellen Untersuchungen an Tragelementen in Glas-Kunststoff-Hybridbauweise resultieren.

5.4.1 Sicherheitsbetrachtungen

Bei den Sicherheitsbetrachtungen eines redundant wirkenden Tragsystems sind für die unterschiedlichen Zustände von Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit im Grunde genommen zwei unterschiedliche Systemzustände zu analysieren. Für die Betrachtung der Gebrauchstauglichkeit ist davon auszugehen, dass ein Glasbruch unbedingt zu vermeiden ist, da hierdurch die optische und strukturelle Funktion des hybriden Tragelementes wesentlich beeinträchtigt wird.

Bei Überschreitung seiner Zugfestigkeit tritt ein Spröbruch im Glaselement ein. Das Initialversagen erfolgt unmittelbar und ohne Vorankündigung. In der Folge nimmt die Steifigkeit des Glas-Kunststoff-Hybridelementes schlagartig ab. Um eine ausreichende Systemsicherheit im Grenzzustand der Tragfähigkeit gewährleisten zu können, ist es erforderlich, dass:

- die freiwerdende Bruchenergie des Glases von der Klebverbindung und dem Kunststoff aufgenommen werden kann und
- die plastische Grenztragfähigkeit des Glas-Kunststoff-Hybridelementes im gerissenen Zustand II größer als die elastische Tragfähigkeit des Hybridelementes im Zustand I ist.

Durch Einhaltung dieser Anforderungen ist sichergestellt, dass im Fall eines Glasbruchs die Tragfähigkeit des Hybridelementes zumindest temporär erhalten bleibt. Bei statisch unbestimmten Systemen erfolgt zudem durch den Steifigkeitsabfall beschädigter Hybridelemente eine Lastumlagerung, die zur Ausbildung von Fließgelenken und einer plastischen Schnittkraftumlagerung führt.

Der Wechsel des Systemzustandes vom ungerissenen Zustand I zum gerissenen Zustand II bewirkt eine optische Beeinträchtigung des Hybridelementes, das zudem einen Verlust an Steifigkeit erleidet. Damit ist eine leichte Erkennbarkeit des aufgetretenen Schadens gegeben.

Im gerissenen Zustand II führt das Kriechverhalten des Kunststoffes bei langandauernden hohen Belastungen zu einem stetigen Anwachsen der Verformungen. Daher ist es erforderlich, beschädigte Hybridelemente unmittelbar nach dem Eintreten eines Glasbruches zu entlasten und anschließend zu ersetzen. Die durchgeführten Langzeituntersuchungen an beschädigten Hybridelementen zeigen, dass hohe Resttragfähigkeiten für eine Belastungsdauer von drei Tagen nach dem Auftreten eines Glasbruchs bestehen.

5.4.2 Bemessung

Eine strukturelle Bemessung von Glas-Kunststoff-Hybridelementen wird ausschließlich für Verbundquerschnitte mit kompakter Ausbildung der Anschlussbereiche zwischen Gurt und Steg empfohlen. Bei diesen Querschnitten kann für kurzzeitig einwirkende Belastungen annähernd von einem ebenen Verzerrungszustand im gesamten Hybridquerschnitt ausgegangen werden. Damit können die in Abschnitt 5.1.2 dargestellten ingenieurmäßigen Berechnungsmodelle angewandt werden. Das Design der Hybridelemente ist so auszulegen, dass die im vorigen Abschnitt 5.4.1 festgelegten Randbedingungen einer Querschnittsgestaltung erfüllt werden.

Die Bemessung erfolgt für drei grundlegende Einsatzkriterien:

- gegenüber kurzzeitigen Einwirkungen (Systemzustand I)
- gegenüber permanent wirkenden Einwirkungen (Systemzustand I)
- gegenüber kurzzeitigen Einwirkungen im Systemzustand II.

Es wird empfohlen, die Bemessung des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit auf den ungerissenen Systemzustand I anzuwenden.

Die Bemessung von Glas-Kunststoff-Hybridelementen hinsichtlich eines Brandwiderstandes ist nicht möglich, da die Klebverbindung und der Kunststoff bei Temperaturen $\vartheta > 80\text{ °C}$ einen Verlust von Steifigkeit und Festigkeit aufweisen.

Bemessung gegen kurzzeitige Einwirkungen (Systemzustand I)

Bei kurzzeitigen Beanspruchungen ist die Bemessung der

- Glaskantenfestigkeit und der
- strukturellen Klebverbindung im Anschlussbereich zwischen Steg und Gurt

erforderlich. Die Berechnung der auftretenden Beanspruchung kann mittels ingenieurmäßiger Betrachtung, wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben, erfolgen. Es sind entsprechende Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchung des Glases und der Klebverbindung zu definieren. Die Bemessung des Glases kann nach der geltenden Norm DIN 18008 erfolgen (Deutsches Institut für Normung, 2010). Der Bemessungswert X_d für die Klebverbindung ($\tau_{R,d}$) wird in Anlehnung an die DIN 1990 (Deutsches Institut für Normung, 2010) definiert.

$$X_d = \eta \times \frac{X_k}{\gamma_{M,Kleb}}. \quad (5.8)$$

Als charakteristischer Wert der Schubfestigkeit der Klebverbindung X_k ist ein aus Versuchen zu bestimmender charakteristischer Wert anzusetzen.

Der Umrechnungsbeiwert η für Auswirkungen von Alterung und Temperatureinwirkungen wird definiert mit:

$$\eta = 0,5.$$

Der Teilsicherheitsbeiwert für Festigkeitsschwankungen in der Klebstoffcharge und Veränderungen in den Adhäsionseffekten wird aktuell (basierend auf den zeitlich begrenzten Erfahrungen) definiert mit:

$$\gamma_{M,Kleb} = 1,5.$$

Bemessung gegen permanent wirkende Einwirkungen (Systemzustand I)

Bei langfristig einwirkenden Belastungen ist die reduzierte Wirkung des Schubverbundes durch Kriechen des Kunststoffes in geeigneter Form zu berücksichtigen. Die daraus entstehende Tragfähigkeitsminderung ist auf den speziellen Anwendungsfall hin anzupassen. Wesentliche Kenngrößen dafür sind:

- die Querschnittsgeometrie,
- die Art des verwendeten Kunststoffes und die
- Parameter der Klebverbindung.

Grundsätzlich gilt, dass Beanspruchungen bei geringen Umgebungstemperaturen unkritischer zu betrachten sind als Beanspruchungen unter hohen Temperatureinwirkungen. Hier sind die temperaturabhängigen Kriecheigenschaften des Kunststoffes und der Klebverbindung zu berücksichtigen.

Bemessung gegen kurzzeitige Einwirkungen im Systemzustand II

Die Ausbildung des Systemzustandes II wird in der Bemessung nur als Sicherheitsreserve betrachtet. Basierend auf den Sicherheitsbetrachtungen von Abschnitt 5.4.1 gilt die Anforderung:

$$R_{\text{Glas-Kunststoff}}^{\text{Zustand II}} \geq 1,1 \times R_{\text{Glas-Kunststoff}}^{\text{Zustand I}} \quad (5.9)$$

Damit kann sichergestellt werden, dass für den Fall eines Glasbruches mit dem dazugehörigen Systemwechsel vom Zustand I zum Zustand II ein schlagartiges Totalversagen der Konstruktion vermieden wird.

6 Zusammenfassung / Ausblick

Die Entwicklung von Hybridtechnologien führt zu vielen neuartigen und effizienten Anwendungen. Hybridtechnologien kommen immer dann zum Einsatz, wenn die ausschließliche Nutzung einer Technologie oder eines Werkstoffs nicht zum gewünschten Ergebnis führt. Dann kann durch Kombination unterschiedlicher Werkstoffe oder Technologien ein System geschaffen werden, das in seiner Konfiguration ein Optimum an Eigenschaften darstellt.

Im Bauwesen geht die Entwicklung schon seit jeher in Richtung von immer schlankeren architektonisch ansprechenden Konstruktionen. In der gegenwärtigen Entwicklung ermöglichen hochtechnologische Kunststoffe und Faserwerkstoffe, wie z. B. Kohlenstofffasern, sehr schlanke, leichte und dennoch hochtragfähiger Konstruktionen. Der wirtschaftliche Aspekt bei der Entwicklung von Tragsystemen bzw. -strukturen erfordert dabei in fast allen Fällen eine kostengünstig effiziente Ausbildung und die Optimierung von Trageigenschaften und Kostenfaktoren. Daher besteht oft die Anforderung nach einem Verbundsystem, bei dem unterschiedliche Materialien in der Art miteinander kombiniert werden, dass jeder Werkstoff für eine bestimmte Beanspruchung angeordnet wird und sein Tragfähigkeitspotenzial optimal ausschöpft. Im Rahmen dieser Arbeit werden an konkreten Beispielen Möglichkeiten aufgezeigt, Hochtechnologiewerkstoffe in effizienter Art und Weise zu nutzen.

Der Kunststoff-Faser-Verbundwerkstoff stellt eine Möglichkeit dar, den als solches nur für dünn-schichtige Klebverbindungen nutzbaren Klebstoff in seinen Anwendungsmöglichkeiten zu erweitern. Die Fasern wirken dabei dem mechanischen Schwachpunkt des Klebstoffs, einer nur geringen Zugfestigkeit, effektiv entgegen. Mit faserverstärkten Klebstoff können Anwendungen realisiert werden, bei denen der Klebstoff auch zur Zugkraftübertragung genutzt wird. Zusätzlich bieten Füllstoffe eine Möglichkeit, die Steifigkeit des Klebstoffs zu steigern, was für viele mechanischen Beanspruchungen Vorteile mit sich bringt. Die Kombination aus einem partikelgefüllten und zusätzlich faserverstärkten Klebstoff führt zu einem Verbundwerkstoff, der für viele unterschiedliche Anwendungen geeignet ist. Praktische Anwendungsmöglichkeiten finden sich in der Herstellung von Fassadenelementen, wo der faserverstärkte Klebstoff zur Verbindung von Aluminiumhohlprofilen verwendet wird. Weitere Anwendungsgebiete erstrecken sich auf die Zugkraftbewehrung von Betontragelementen, bei denen der faserverstärkte Klebstoff die Rolle einer Zugbewehrung an der Betonoberfläche übernimmt.

Alu-CFK-Hybridelemente ermöglichen die Herstellung sehr effizienter Tragsysteme, bei denen Gewichtsreduzierung der Tragstruktur und Kosteneinsparungen im Betrieb des Bauwerks gleichermaßen ermöglicht werden. Die CFK-Lamellen werden dabei in den am stärksten längskraftbeanspruchten Bereichen eines Aluminiumtragelementes angeordnet, wodurch sich die Biegetragfähigkeit des dann hybriden Tragelements signifikant erhöht. In der Folge können Gewichtsreduzierungen, verglichen mit herkömmlichen Aluminiumtragelementen, erzielt werden. Weiterhin können die Querschnittsaußenmaße bei Alu-CFK-Hybridelementen deutlich reduziert werden. In der Folge vereinfachen sich der Transport und die Montage dieser Art Tragwerke, was besonders bei fliegenden Bauten einen wesentlichen Vorteil darstellt.

Der Einsatz von Glas-Kunststoff-Hybridelementen ermöglicht die Konstruktion transparenter Tragstrukturen in einer optisch einzigartigen Qualität. Die Konstruktion eines Glas-Kunststoff-Hybridelementes ermöglicht ein redundant wirkendes Tragverhalten, bei dem die Steifigkeit und optische Qualität des Glases optimal im Tragsystem genutzt werden können. Der Kunst-

stoff stellt eine Art Sicherheitselement dar und übernimmt im Falle eines Glasbruchs die Tragwirkung des Glases. Die Eigenschaft der Vorankündigung eines Systemversagens stellt die Grundlage für eine baupraktische Anwendung des Glas-Kunststoff-Hybridelementes als statisches Tragsystem dar. Durch die Redundanz des Tragverhaltens von Glas-Kunststoff-Hybridelementen ist das Versagen dieser Tragstruktur durch optische oder strukturelle Anzeichen erkennbar und eine Bemessung somit möglich.

Für die mechanische Analyse grundlegender Zusammenhänge in Hybridsystemen können ingenieurmäßige, analytische und numerische Betrachtungen durchgeführt werden. Die ingenieurmäßigen Betrachtungen sind sehr gut geeignet, um Abschätzungen zu treffen, die in später durchgeführten experimentellen Bauteiluntersuchungen oft auch ihre Bestätigung fanden. Bei Detailbetrachtungen, wie z. B. der Analyse eines nichtlinearen Spannungsverlaufes in mechanisch beanspruchten Klebfugen, bietet eine numerische Betrachtung mittels FEM Vorteile, da sie eine sehr detaillierte Auswertung in Bereichen mit hohen Spannungsgradienten ermöglicht. Durch die Anwendung der FEM ist es möglich, Strukturen in unterschiedlichen Skalierungsbereichen zu analysieren und dabei auch Bereiche einzubeziehen, die für experimentelle Untersuchungen nur sehr schwer zugänglich sind. Genaue Kenntnisse über das Materialverhalten der zu analysierenden Stoffe stellen dabei eine wesentliche Grundlage für die Erstellung qualitativ hochwertiger Rechenmodelle dar.

6.1 Bewertung der Forschungsergebnisse

Bei der Entwicklung von Hybridsystemen im Bauwesen werden verschiedene Werkstoffe mit z. T. sehr unterschiedlichen Eigenschaften miteinander kombiniert. Daraus resultieren sehr effiziente Tragsysteme, bei denen die Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe optimal ausgenutzt werden können. Voraussetzung für die Nutzung der Trageigenschaften aller verwendeten Ausgangswerkstoffe ist eine strukturelle Verbindung der Werkstoffe untereinander. Für die Herstellung dieser Verbindung ist die Klebtechnologie in vielen Fällen sehr gut geeignet. Die Vielzahl der zur Auswahl stehenden Klebstoffe ermöglicht eine speziell auf die Anforderungen abgestimmte Verbindung. Der Klebstoff spielt dabei die Rolle eines Vermittlers zwischen den verschiedenen Werkstoffen, der zum einen die strukturelle Verbindung der Werkstoffe untereinander ermöglicht, zum anderen aber auch gegensätzlich wirkende Werkstoffeigenschaften, wie z. B. unterschiedliche Temperaturdehnungen, ausgleicht.

Die Herstellung einer dauerhaft wirksamen strukturellen Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe mittels Klebstoff setzt auch immer eine ganzheitliche Betrachtung aller auf das Hybridsystem einwirkenden Faktoren voraus. Dabei müssen alle in Frage kommenden Randbedingungen, wie mechanische und elektrische Eigenschaften, aber auch äußere Einwirkungen, wie Temperaturwechsel oder UV-Strahlung, mit einbezogen werden. Nur so können die dem Bauteil zugeschriebenen Trageigenschaften über die prognostizierte Lebensdauer mit einer entsprechenden Sicherheit gewährleistet werden.

Die Trageigenschaften eines Hybridsystems sind i. Allg. abhängig von den:

- Eigenschaften der Ausgangswerkstoffe und
- Verbundeigenschaften.

Eine ganzheitliche Betrachtung des Hybridsystems schließt damit die Eignungsüberprüfung der ausgewählten Ausgangswerkstoffe und die Betrachtung der Verbundeigenschaften unter den gegebenen Randbedingungen ein. Die Verbindungstechnologie ist dabei als wesentlicher Bestandteil eines Hybridsystems mit einzubeziehen.

In der strukturellen Verbindung von unterschiedlich steifen Werkstoffen treten bei mechanischer Belastung des Hybridsystems Beanspruchungen auf, die besonders in den Anfangs- und Endbereichen der strukturellen Verbindung zu hohen Schubbeanspruchungen führen. Dabei können sich Temperaturbeanspruchungen mit statischen Beanspruchungen überlagern, was zu kritischen Beanspruchungssituationen führen kann. In einer ganzheitlichen Beanspruchungssituation ist ein Hybridsystem immer nur so leistungsfähig wie sein schwächstes, versagensinitiiertes Glied. Bei Ausfall einer Trag- oder Verbundkomponente verliert das Hybridsystem dann einen Teil seiner Trageigenschaften.

Die Entwicklung neuartiger Hybridsysteme setzt umfangreiche Betrachtungen unterschiedlicher Tragzustände und Randbedingungen voraus. Die Kombination von experimentellen Untersuchungen und numerischen Analysen stellt eine wirkungsvolle Variante zur Verkürzung von erforderlichen Entwicklungszeiträumen und der Reduzierung anfallender Entwicklungskosten dar. In experimentellen Untersuchungen sind zunächst die Materialeigenschaften der verwendeten Ausgangswerkstoffe zu bestimmen. Die Verwendung möglichst realistischer, temperatur- und zeitabhängig definierter Materialmodelle ist für eine realitätsnahe Betrachtung der mechanischen Zusammenhänge innerhalb des Hybridelementes von wesentlicher Bedeutung. Das wird insbesondere in numerischen Vergleichsbetrachtungen deutlich, die unterschiedliche Modellqualitäten repräsentieren. Die numerische Analyse erlaubt dann eine gezielte Optimierung und Anpassung verschiedener Systemparameter, wobei experimentelle Untersuchungen zur Validierung und Verifikation der numerischen Modelle verwendet werden.

Die drei schwerpunktmäßig untersuchten Hybridsysteme:

- Faserverstärkte Klebstoffe
- Alu-CFK-Hybridelemente und
- Glas-Kunststoff-Hybridelemente

zeigen unter den jeweilig definierten Randbedingungen ein Tragverhalten auf, das bei Verwendung eines einzelnen Werkstoffs nicht erzielt werden kann. Aus der Kombination der einzelnen Ausgangswerkstoffe geht also ein Hybridsystem hervor, das einzigartige Eigenschaften aufweist.

Der faserverstärkte Klebstoff erweitert z. B. den Anwendungsbereich der Klebstoffe auf Bereiche, die vorher nur mit Spritzgusswerkstoffen abgedeckt werden konnten. Ein entscheidender Vorteil des faserverstärkten Klebstoffs gegenüber dem Spritzguss besteht in den adhäsiven Eigenschaften, die eine Brücke zu den Klebverbindungen bilden.

Alu-CFK-Hybridelemente ermöglichen speziell bei fliegenden Bauten eine entscheidende Gewichts- und Transportvolumenreduktion gegenüber herkömmlichen Systemen, die vorwiegend aus Aluminiumlegierung gefertigt werden. Durch die vielfachen Transport- und Montagevorgänge, die bei fliegenden Bauten für jedes Bauteil zu bewältigen sind, rechtfertigt sich der höhere Aufwand eines solchen Hybridsystems mit einem reduzierten Aufwand während des Betriebs der Tragstruktur.

Glas-Kunststoff-Hybridelemente ermöglichen die Ausbildung vollständig transparenter Tragsysteme, die eine Bereicherung für die Stilrichtung der transparenten Architektur darstellen. Der hybride Verbund aus Glas und Kunststoff ermöglicht die Herstellung schlanker und transparenter Strukturen, die den aktuell gültigen Sicherheitsbestimmungen im Bauwesen gerecht werden.

6.2 Zukünftige Entwicklungen

In zukünftigen Entwicklungen wird sich die Anwendung von Faserwerkstoffen und Kunststoffen auch im Bauwesen weiter durchsetzen. Faserwerkstoffe, insbesondere Kohlenstofffasern, weisen extrem hohe gewichtsbezogene Tragfähigkeiten auf, die auch hochfeste Stahlsorten weit übersteigen. Die Anwendung der Faserwerkstoffe wird dabei zuerst Hochtechnologiebereiche dominieren und ist bei entsprechender Kostenentwicklung auch bei Standardprodukten interessant. Aktuell übernimmt die Zeltindustrie eine Vorreiterrolle, da hier Produkte vermarktet werden, bei denen die Erstellungskosten nur einen Teil der ganzheitlichen Kostenbetrachtung darstellen. CFK-Werkstoffe sind bereits zur Verstärkung sehr schlanker weitgespannter Brückensystemen angewandt worden und werden in Zukunft einen größeren Marktanteil erreichen.

Die Anwendung von faserverstärkten Klebstoffsystemen ist im Wesentlichen von einer robusten und industriell einsetzbaren Applikationstechnologie abhängig. Gegenwärtig erfolgen hinsichtlich der Entwicklung entsprechender Misch- und Applikationssysteme umfangreiche Untersuchungen, die zum Einsatz neuer Verbindungstechnologien führen können (Werner, et al., 2011).

Transparente Tragsysteme aus Glas und Kunststoff werden für die Architektur offener, lichtdurchfluteter Bauwerke zukünftig stark an Bedeutung gewinnen. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens der Bauhaus-Universität Weimar in Zusammenarbeit mit der TU Dresden soll ein transparenter Messepavillon hergestellt werden, der durch das Vorsehen von Montagestößen zwischen den Glas-Kunststoff-Hybridelementen eine transportable, montagefreundliche Konstruktion aufweist.

Im Automobilbau wird die Anwendung von Faserverbundwerkstoffen verstärkt vorangetrieben. Auch hier erfolgt eine Entwicklung von oben nach unten. Besonders CFK-Werkstoffe bieten hier die Möglichkeit einer drastischen Gewichtsreduzierung zukünftiger Automobile. Das bringt vor allem Vorteile in der Performance von Supersportwagen, andererseits kann die Energieeffizienz von Automobilen stark verbessert werden.

Die breite Anwendung von hochleistungsfähigen Kunstfaserwerkstoffen führt voraussichtlich zu fallenden Werkstoffkosten, womit die Anwendung von Faserwerkstoffen im Bauwesen auch außerhalb von kostenintensiven Hochtechnologiebereichen des Metallbaus, wie z. B. den fliegenden Bauten, möglich erscheint. Damit kann ein Entwicklungssprung in möglichen Bauteilschlankheiten und -gewichten realisiert werden, wie er z. B. durch den Entwicklungsschritt vom Stahlbeton zum Spannbeton verwirklicht wurde.

7 Abbildungs- und Tabellenverzeichnisse

7.1 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2.1:	SPEZIELLE ANWENDUNGSBEREICHE VON HYBRIDSYSTEMEN	15
ABBILDUNG 2.2:	MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN.....	19
ABBILDUNG 2.3:	DARSTELLUNG DES ORIENTIERUNGSGRADES BEI FASERN.....	20
ABBILDUNG 2.4:	TEMPERATURABHÄNGIGE EIGENSCHAFTEN VON ALUMINIUMWERKSTOFFEN	22
ABBILDUNG 2.5:	AUSWIRKUNG DES GRÖßENEFFEKTS AUF DIE ZUGFESTIGKEIT VON GLASFASERN	23
ABBILDUNG 2.6:	AUSBILDUNG VON LÄNGSDEHNUNG UND -SPANNUNG	24
ABBILDUNG 2.7:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINER KLEBVERBINDUNG	34
ABBILDUNG 2.8:	AUSWIRKUNG VON UV-EINSTRALUNG	36
ABBILDUNG 2.9:	ELEMENTARTEN FÜR DIE VERWENDUNG IN FEM-ANALYSEN (SAS IP, Inc., 2010).....	39
ABBILDUNG 3.1:	OBERFLÄCHE EINES MULTIAXIAL KLEBSTOFF-FASER-VERBUNDWERKSTOFFS.....	44
ABBILDUNG 3.2:	FASERORIENTIERUNG MIT AUSWIRKUNG AUF DIE BELASTBARKEIT	44
ABBILDUNG 3.3:	FASERORIENTIERUNG MIT AUSWIRKUNG AUF DIE BELASTBARKEIT	45
ABBILDUNG 3.4:	EIGENSCHAFTEN EINER AUSGEHÄRTETEN 2K-EPOXIDHARZ-KLEBSTOFFPROBE	48
ABBILDUNG 3.5:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES UNIDIREKTIONALEN FASER-MATRIX-SYSTEMS ...	50
ABBILDUNG 3.6:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES UNIDIREKTIONALEN FASER-MATRIX-SYSTEMS ...	51
ABBILDUNG 3.7:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES UNIDIREKTIONALEN FASER-MATRIX-SYSTEMS ...	51
ABBILDUNG 3.8:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES UNIDIREKTIONALEN FASER-MATRIX-SYSTEMS ...	52
ABBILDUNG 3.9:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES FASER-MATRIX-SYSTEMS	53
ABBILDUNG 3.10:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE DER SCHUBSPANNUNGSVERTEILUNG.....	53
ABBILDUNG 3.11:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES STOCHASTISCH VERTEILTEN SYSTEMS	55
ABBILDUNG 3.12:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES STOCHASTISCH VERTEILTEN SYSTEMS	56
ABBILDUNG 3.13:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES MULTIAXIAL FASER-MATRIX-SYSTEMS	58
ABBILDUNG 3.14:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES FASER-MATRIX-SYSTEMS	59
ABBILDUNG 3.15:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES FASER-MATRIX-SYSTEMS	61
ABBILDUNG 3.16:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES FASER-MATRIX-SYSTEMS	62
ABBILDUNG 3.17:	BRUCHFLÄCHEN ADHÄSIV WIRKENDER FASER-MATRIX-SYSTEME	63
ABBILDUNG 3.18:	OBERFLÄCHE EINES STAHLFASER-GEFÜLLTEN EPOXIDHARZES	64
ABBILDUNG 3.19:	BRUCHKANTE VON STAHLFASERBEWEHRTEM EPOXIDHARZ	65
ABBILDUNG 3.20:	BRUCHKANTE EINES GLASFASERVERSTÄRKTEN EPOXIDHARZKLEBSTOFFS	66
ABBILDUNG 3.21:	BRUCHFLÄCHEN ADHÄSIV WIRKENDER FASER-MATRIX-SYSTEME	67
ABBILDUNG 3.22:	ABHÄNGIGKEIT VON HÄRTUNGSDAUER UND TEMPERATUR DES KLEBSTOFFS	68
ABBILDUNG 3.23:	ZUSAMMENHANG ZWISCHEN VISKOSITÄT UND TEMPERATUR	69
ABBILDUNG 3.24:	BRUCHFLÄCHE DES 2K-EPOXIDHARZES GEFÜLLT MIT SiO ₂ NACH ZUGBEANSPRUCHUNG .	70
ABBILDUNG 3.25:	KFV-B; A: ANSICHT DER OBERFLÄCHE; B: BRUCHFLÄCHE NACH ZUGBEANSPRUCHUNG ..	71
ABBILDUNG 3.26:	SCHLIFFBILDER VON KFV-B IN UNTERSCHIEDLICHEN VERGRÖßERUNGEN.....	72
ABBILDUNG 3.27:	KFV-B NACH BRUCH; A: ZUGSTAB; B: BRUCHDETAIL	73
ABBILDUNG 3.28:	BRUCHFLÄCHE VON KFV-B NACH ZUGBEANSPRUCHUNG	73
ABBILDUNG 3.29:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES ZUGVERSUCHS AM PROBEKÖRPER	74
ABBILDUNG 3.30:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON VERGLEICHSSPANNUNG AUFGETRAGEN	75
ABBILDUNG 3.31:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES DRUCKVERSUCHES.....	76
ABBILDUNG 3.32:	KFV-B NACH ERSTEM ANRISS IM 3-PUNKT-BIEGEVERSUCH.....	77
ABBILDUNG 3.33:	VERGLEICH DER BIEGEEIGENSCHAFTEN; BLAU: UNVERSTÄRKTER KLEBSTOFF	77
ABBILDUNG 3.34:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES 3-PUNKT-BIEGEVERSUCHES	79
ABBILDUNG 3.35:	BRUCHBILD NACH ABSCHERVERSUCH	80
ABBILDUNG 3.36:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES ABSCHERVERSUCHES	81
ABBILDUNG 3.37:	BRUCHFLÄCHEN DES KFV-A MIT KOHLENSTOFFFASERN.....	83
ABBILDUNG 3.38:	BRUCHFLÄCHE VON KFV-A MIT SILANBESCHICHTETEN KOHLENSTOFFFASERN	84

ABBILDUNG 3.39: AUSWIRKUNG DER KLIMABEANSPRUCHUNG.....	85
ABBILDUNG 3.40: INDUKTIVE ERWÄRMUNG EINES KfV IM ALUMINIUMHOHLPROFIL QR25	87
ABBILDUNG 3.41: TEMPERATURENTWICKLUNG INFOLGE INDUKTIVER ERWÄRMUNG	87
ABBILDUNG 3.42: HERSTELLUNG UND VERARBEITUNG VON KfV-B	89
ABBILDUNG 3.43: MISCH- UND FÖRDEREINRICHTUNG FÜR HOCHVISKOSE KUNSTSTOFFMONOMERE	90
ABBILDUNG 3.44: SCHEMATISCHER ABLAUF FÜR DIE HERSTELLUNG UND APPLIKATION EINES KfV.....	90
ABBILDUNG 4.1: PRINZIPIELLER QUERSCHNITT GESCHLOSSENER KASTENQUERSCHNITTE.....	95
ABBILDUNG 4.2: VERGLEICH ZWISCHEN NOMINELLEN SPANNUNGEN σ_{NOMINELL}	101
ABBILDUNG 4.3: BRUCHFLÄCHEN VON ZUGPROBEN EINER STRANGGEPRESSTEN ALUMINIUMLEGIERUNG	101
ABBILDUNG 4.4: OBERFLÄCHEN EINER ALUMINIUMLEGIERUNG	102
ABBILDUNG 4.5: SCHLIFFBILDER UNTERSCHIEDLICHER CFK-LAMELLEN	104
ABBILDUNG 4.6: ZUGVERSUCH AN EINER CFK-LAMELLE; A: CFK-LAMELLE MIT DMS.....	106
ABBILDUNG 4.7: ERGEBNISSE FÜR ZUGVERSUCHE AN CFK-LAMELLEN	106
ABBILDUNG 4.8: VERSAGENSbild EINER CFK-LAMELLE INFOLGE DRUCKBEANSPRUCHUNG.....	107
ABBILDUNG 4.9: DRUCKVERSUCH AN EINER CFK-LAMELLE	108
ABBILDUNG 4.10: ERGEBNIS VON DRUCKVERSUCHEN AN UNTERSCHIEDLICHEN CFK-LAMELLEN	108
ABBILDUNG 4.11: QUERDEHNZAHL IN ABHÄNGIGKEIT DER LÄNGSSPANNUNG	109
ABBILDUNG 4.12: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINER CFK-LAMELLE	110
ABBILDUNG 4.13: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES CFK-LAMELLEN-MIKROMODELLS	111
ABBILDUNG 4.14: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINER CFK-LAMELLE	112
ABBILDUNG 4.15: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES CFK-LAMELLEN-AUSSCHNITTS	113
ABBILDUNG 4.16: PROBEKÖRPER FÜR ZUGPRÜFVERSUCHE NACH DIN EN ISO 527-4.....	114
ABBILDUNG 4.17: ZUGEIGENSCHAFTEN UNTERSCHIEDLICHER POLYURETHANKLEBSTOFFE	114
ABBILDUNG 4.18: KRIECHEIGENSCHAFTEN UNTERSCHIEDLICHER POLYURETHANKLEBSTOFFE	115
ABBILDUNG 4.19: VERGLEICH ZWISCHEN EXPERIMENTELLEN UND MITTELS FEM ERMITTELTEN DATEN.....	116
ABBILDUNG 4.20: SCHUBPROBE EINER ZWEISCHNITTIGEN KLEBVERBINDUNG	117
ABBILDUNG 4.21: AUSZUGVERSUCH EINER CFK-LAMELLE AUS EINEM ALUMINIUMPROFIL.....	117
ABBILDUNG 4.22: BRUCHbild EINER SCHUBPROBE BEI EINER PRÜFTEMPERATUR VON $\vartheta = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$	118
ABBILDUNG 4.23: BRUCHbild EINER SCHUBPROBE BEI EINER PRÜFTEMPERATUR VON $\vartheta = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	119
ABBILDUNG 4.24: BRUCHbild EINER SCHUBPROBE BEI EINER PRÜFTEMPERATUR VON $\vartheta = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	119
ABBILDUNG 4.25: SCHUBTRAGFÄHIGKEIT - KURZZEITVERSUCHE PU2 MIT EN AW-6061 T6.....	119
ABBILDUNG 4.26: MODELLIERUNG VON EINER KLEBVERBINDUNG	121
ABBILDUNG 4.27: VERSUCHSKONFIGURATION FÜR AUSZUGSVERSUCHE.....	122
ABBILDUNG 4.28: TRAGFÄHIGKEIT KLEBVERBINDUNG - PRÜFTEMPERATUR.....	122
ABBILDUNG 4.29: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES CFK-LAMELLEN-AUSZUGSVERSUCHES.....	123
ABBILDUNG 4.30: NUMERISCH ERMITTELTE SCHUBSPANNUNG	124
ABBILDUNG 4.31: BELASTUNGS- UND ZEITABHÄNGIGE REAKTION DER KLEBFUGE	125
ABBILDUNG 4.32: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE DES DAUERBELASTUNGS-AUSZUGSVERSUCHES	126
ABBILDUNG 4.33: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE DES DAUERBELASTUNGS-AUSZUGSVERSUCHES	127
ABBILDUNG 4.34: VERGLEICH ZWISCHEN EXPERIMENTELLEN UND FEM KRIECHVERFORMUNGEN.....	127
ABBILDUNG 4.35: A: BERECHNETE SCHUBSPANNUNGSVERTEILUNG KLEBFUGE	128
ABBILDUNG 4.36: ALU-CFK-HYBRIDQUERSCHNITT RR 200x100 mm ²	129
ABBILDUNG 4.37: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES ALU-CFK-HYBRIDELEMENTES.....	130
ABBILDUNG 4.38: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON SCHUBSPANNUNG IN DER KLEBFUGE	131
ABBILDUNG 4.39: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON NORMALSPANNUNG IM ALUMINIUMGURT	131
ABBILDUNG 4.40: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON NORMALSPANNUNG IN DER CFK-LAMELLE	132
ABBILDUNG 4.41: AUSGEWÄHLTE ALU-CFK-HYBRIDQUERSCHNITTE	134
ABBILDUNG 4.42: STATISCHES SYSTEM EINES BETRACHTETEN KRAGTRÄGERS MIT EINZELLAST.....	135
ABBILDUNG 4.43: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES PRÜFKÖRPERS	135
ABBILDUNG 4.44: VERSUCHSAUFBAU FÜR DIE MOMENTENBEANSPRUCHUNG AM TYP 2	136
ABBILDUNG 4.45: ERGEBNISSE DES KRAGARMVERSUCHS MIT HEBELARM L = 1.600 mm AM TYP1	136
ABBILDUNG 4.46: ERGEBNISSE DES KRAGARMVERSUCHS MIT HEBELARM L = 2.600 mm AM TYP1	137
ABBILDUNG 4.47: ERGEBNISSE DES KRAGARMVERSUCHS AM TYP 2	137

ABBILDUNG 4.48: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON SPANNUNGEN IN DER CFK-LAMELLE	139
ABBILDUNG 4.49: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON SPANNUNGEN IN DER CFK-LAMELLE	140
ABBILDUNG 4.50: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON SPANNUNGEN IN DER CFK-LAMELLE	141
ABBILDUNG 4.51: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON MAXIMALEN SPANNUNGEN	141
ABBILDUNG 4.52: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON SCHUBSPANNUNGEN $\tau_{\text{LÄNGS}}$	142
ABBILDUNG 4.53: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON SCHUBSPANNUNGEN $\tau_{\text{LÄNGS}}$	143
ABBILDUNG 5.1: PRINZIPIELLER AUFBAU EINES GLAS-KUNSTSTOFF-HYBRIDELEMENTES _y	149
ABBILDUNG 5.2: KRITISCHE SCHUBFUGEN BEI REINER MOMENTBEANSPRUCHUNG M_y	150
ABBILDUNG 5.3: BRUCHFLÄCHE VON KALK-NATRON-GLAS	151
ABBILDUNG 5.4: VERSUCHSKÖRPER FÜR DIE DURCHFÜHRUNG DES EINAXIALEN ZUGVERSUCHS	153
ABBILDUNG 5.5: BESTIMMUNG DER MECHANISCHEN MATERIALEIGENSCHAFTEN	153
ABBILDUNG 5.6: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE DES MATERIALVERHALTENS VON POLYCARBONAT	154
ABBILDUNG 5.7: ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE DER SCHERFESTIGKEIT VON KLEBVERBINDUNGEN	155
ABBILDUNG 5.8: VARIANTEN EINES HYBRIDTRÄGERS; A: QUERSCHNITT A; B: QUERSCHNITT B	156
ABBILDUNG 5.9: TRÄGER IM VIER-PUNKT-BIEGEVERSUCH MIT RISS IM GLAS-STEGELEMENT	156
ABBILDUNG 5.10: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN EINES HYBRIDTRÄGERS	157
ABBILDUNG 5.11: DEHNUNGS- UND SPANNUNGSVERLAUF EINES HYBRIDELEMENTES	158
ABBILDUNG 5.12: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN EINES BESCHÄDIGTEN HYBRIDTRÄGERS	159
ABBILDUNG 5.13: UNTERSUCHUNG EINER LÖSBAREN MONTAGEVERBINDUNG	160
ABBILDUNG 5.14: UNTERSUCHUNG EINER GEKLEBTEN UNLÖSBAREN ECKVERBINDUNG	161
ABBILDUNG 5.15: ECKMOMENT-VERFORMUNGS-KURVEN	162
ABBILDUNG 5.16: EXPERIMENTALBAU EINER TRANSPARENTE TREPPENKONSTRUKTION	163
ABBILDUNG 5.17: EXPERIMENTALBAU EINER TRANSPARENTE KUPPELKONSTRUKTION	163
ABBILDUNG 5.18: DETAILAUSBILDUNGEN DER KUPPELKONSTRUKTION	164
ABBILDUNG 5.19: FREIBEWETTERUNG DER KUPPELKONSTRUKTION (HILDEBRAND, 2008)	164
ABBILDUNG 5.20: BEISPIELE FÜR KLEBSTOFFEIGENSCHENUNGEN	166
ABBILDUNG 5.21: GANZGLASKONSTRUKTION EINES WINTERGARTENS	167

7.2 Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: GRUNDLEGENDE BETRACHTUNG DER MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN	17
TABELLE 2-2: REIßLÄNGE UND SPEZIFISCHE FESTIGKEIT UNTERSCHIEDLICHER WERKSTOFFE	20
TABELLE 2-3: MECHANISCHE KENNGRÖßEN VERSCHIEDENER METALLERZEUGNISSE	21
TABELLE 2-4: MATRIX FÜR ZUR AUSWAHL GEEIGNETER FASERVERSTÄRKTER KLEBSTOFFE	25
TABELLE 2-5: MATRIX FÜR ZUR AUSWAHL GEEIGNETER VERSTÄRKUNGSSYSTEME	26
TABELLE 3-1: MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DES UNVERSTÄRKTEN EPOXIDHARZKLEBSTOFFES	69
TABELLE 3-2: MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN UNTERSCHIEDLICHER MODIFIKATIONEN VON KfV-B	70
TABELLE 4-1: EIGENSCHAFTEN VERSCHIEDENER ALUMINIUMWERKSTOFFE (HESSE, 2007)	101
TABELLE 4-2: STANDARDPOTENTIAL AUSGEWÄHLTER METALLE UND NICHTMETALLE	103
TABELLE 4-3: MATERIALKENNWERTE FÜR DIE NUMERISCHE BETRACHTUNG DER KLEBSTOFFE	120

8 Literatur

8.1 Zitierte Literatur

Adhäsion kleben & dichten Handbuch Klebtechnik 2010/2011 [Buch]. - Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2010. - ISBN: 978-3-8348-1354-1.

Ahlers-Hestermann G. Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik [Buch]. - Erlangen : Hanser Verlag, 2004. - ISBN: 978-3-446-22668-5.

Aichele W. und Baur P. Verfahren zur Herstellung eines Bauteils aus Faserverbundwerkstoffen mit anisotropen Eigenschaften [Patent]: DE3530664A1. - Deutschland, 12. März 1987.

Akademischer Verein Hütte Des Ingenieurs Taschenbuch [Buch]. - Berlin : Wilhelm Ernst & Sohn, 1925.

Altenbach H., Altenbach J. und Rikards R. Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke [Buch]. - Stuttgart : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1996. - ISBN: 978-3-342-00681-1.

Althaus D. Nachhaltigkeit: Denken- Planen- Konstruieren- Bauen- Betreiben [Buch]. - Hannover : Bauwerk Verlag, 2009. - ISBN: 978-3-89932-260-6.

Arbeitsgemeinschaft Schiffbau und Schiffsmaschinenbau Schiff und Hafen [Buch]. - Hamburg : Heydorns Buchdruck, 1972. - Bd. Band 24.

AVK, Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen [Buch]. - Wiesbaden : Vieweg +Teubner, 2010. - ISBN: 978-3-8348-0881-3.

Bach Fr.-W. [et al.] Moderne Beschichtungsverfahren [Buch]. - Garbsen : Wiley-VCH Verlag, 2005. - ISBN: 978-3-527-30977-2.

Bathe K.-J. Finite-Elemente-Methoden [Buch]. - Berlin : Springer, 2002. - ISBN: 978-3-540-66806-3.

Baur E. [et al.] Kunststoff-Taschenbuch [Buch]. - München : Carl Hanser Verlag, 2007. - ISBN: 978-3-446-40352-9.

Baur E. und Thiel C. CAMPUS [Online]. - Chemie Wirtschaftsförderungs-GmbH, 2011. - <http://www.campusplastics.com/>.

Bergmann W. Werkstofftechnik [Buch]. - München : Carl Hanser Verlag, 2002. - ISBN: 978-3-446-21639-1.

Bergmeister K. Kohlenstofffasern im konstruktiven Ingenieurbau [Buch]. - Wien : Ernst & Sohn Verlag, 2003. - ISBN: 978-3-433-02847-8.

Beuschel G. Lackharze: Chemie, Eigenschaften und Anwendungen [Buch]. - Würzburg : Carl Hanser Verlag München Wien, 1996. - ISBN: 978-3-446-17475-3.

Bhagwan D. A., Lawrence J. B. und Chandrashekhara K. Analysis and Performance of Fiber Composites [Buch]. - New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2006. - ISBN: 978-0-471-26891-8.

Blaß H. J. [et al.] Zuverlässigkeit von Fichten-Brettschichtholz mit modifiziertem Aufbau [Buch]. - Karlsruhe : Universitätsverlag Karlsruhe, 2008. - ISBN: 978-3-86644-251-1.

Blaß H. J. und Romani M. Biegezugverstärkung von Brettschichtholz mit CFK- und AFK-Lamellen [Buchabschnitt] // Bautechnik. - Karlsruhe : Ernst & Sohn, 2002. - Bd. Bautechnik. - ISSN: 0932-8351.

Bode K. Aspekte der kohäsiven und adhäsiven Eigenschaften von PCC [Buch]. - Erfurt : Bauhaus-Universität Weimar, 2009.

Bode K. und Dimmig-Osburg A. Untersuchungen zum Einfluss einer Salzbelastung auf den Haftverbund von PCC [Buch]. - Freiberg : GdCh-Monographie Bd. 41, 2009. - ISBN: 978-936028-57-7.

Bode K. und Dimmig-Osburg A. Zur Adhäsion und Kohäsion von PCC - Zusammenfassung von Untersuchungsergebnissen [Buch]. - Weimar : Universitätsverlag BUW, 2009. - ISBN: 978-3-00-027265-3.

Bonnet M. Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung: verstehen und zuverlässig auswählen [Buch]. - Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009. - ISBN: 978-3-8348-0349-8 .

Bonten C. Produktentwicklung: Technologiemanagement für Kunststoffprodukte [Buch]. - München, Wien : Carl Hanser Verlag, 2002. - ISBN: 978-3-446-21696-0.

Bortz J., Lienert G. A. und Boehnke K. Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik [Buch]. - Bremen : Springer Medizin Verlag Heidelberg, 2008. - ISBN: 978-3-540-74706-2.

Braess und Seiffert Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik [Buch]. - Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn, 2007. - ISBN: 978-8348-0222-4.

Brameshuber W. Textilbewehrter Beton – ein neuer Verbundwerkstoff [Buchabschnitt] // Innovationen in der Betonbautechnik / Buchverf. Böhner E. und Müller H. S.. - Karlsruhe : Universitätsverlag Karlsruhe, 2006. - ISBN: 978-3-86644-008-1.

Bräunling W. J. G. Flugzeugtriebwerke [Buch]. - Hamburg : Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004. - ISBN: 978-3-540-40589-5.

Bräutigam K.-H. und Gerybadze A. Wissens- Und Technologietransfer ALS Innovationstreiber [Buch]. - Karlsruhe : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. - ISBN: 978-3-642-16512-2.

Brockmann W. [et al.] Klebtechnik [Buch]. - Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KG, 2005. - ISBN: 978-3-527-31091-3.

Bronstein I. N. [et al.] Taschenbuch der Mathematik [Buch]. - Dresden : Verlag Harri Deutsch, 1999. - ISBN: 978-3-8171-2004-4.

Brouwer W.D. Nature Fibre Composites: Where can Flax Complete with Glass? [Artikel] // SAMPE Journal. - 2000. - No. 6 : Bd. 36. - S. 18-23.

Bullinger H.-J. Technologieführer: Grundlagen- Anwendungen- Trends [Buch]. - München : Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2007. - ISBN: 978-3-540-33788-1.

Bungartz H.-J. [et al.] Modellbildung und Simulation: Eine Anwendungsorientierte Einführung [Buch]. - Garching : Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009. - ISBN: 978-3-540-79809-5.

Bürgel R. Festigkeitslehre und Werkstoffmechanik [Buch]. - Wiesbaden : Vieweg & Sohn Verlag, 2005. - ISBN: 978-3-8348-0077-0.

Center W. L. und Smith A. C. Herstellung von Glas-Kunststoff-Laminaten mit verbesserter optischer Qualität [Patent] : PCT/US91/05395. - USA, 11. Juli 2002.

Degischer H. P. und Lüftl S. Leichtbau: Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten [Buch]. - Wien : Wiley-VCH Verlag, 2009. - ISBN: 978-3-527-32372-2.

Dehn F., König G. und Marzahn G. Konstruktionswerkstoffe im Bauwesen [Buch]. - Leipzig : Ernst & Sohn Verlag, 2003. - ISBN: 978-3-433-01652-6.

Deutsches Institut für Normung DIN 18008 // Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln. - [s.l.] : Beuth Verlag, 2010.

Deutsches Institut für Normung DIN 2344: Ausarbeitung und Gestaltung von terminologischen Festlegungen in Normen [Buch]. - [s.l.] : Beuth Verlag, 2000.

Deutsches Institut für Normung DIN 820-120: Leitfaden für die Aufnahme von Sicherheitsaspekten in Normen [Buch]. - [s.l.] : Beuth verlag, 2008.

Deutsches Institut für Normung DIN EN 14351-1 // Fenster und Türen – Produktnorm, Leistungseigenschaften. - [s.l.] : Beuth Verlag, 08 2010.

Deutsches Institut für Normung DIN EN 14358 // Holzbauwerke - Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben. - [s.l.] : Beuth Verlag, 05 2006.

Deutsches Institut für Normung DIN EN 1990 // Grundlagen der Tragwerksplanung. - [s.l.] : Beuth Verlag, 12 2010.

Deutsches Institut für Normung DIN EN 1999-1-1 // Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken. - [s.l.] : Beuth Verlag, 2007.

Deutsches Institut für Normung DIN EN 1999-1-2 // Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken; Teil 1-2: Tragwerksbemessung für den Brandfall. - [s.l.] : Beuth Verlag, 2007.

Deutsches Institut für Normung DIN EN 923: 2008 Klebstoffe – Benennungen und Definitionen;. - [s.l.] : Beuth Verlag, 2008.

Deutsches Institut für Normung DIN EN ISO 527-4 // Kunststoffe: Bestimmung der Zugeigenschaften. - [s.l.] : Beuth Verlag, 07 1997.

Deutsches Institut für Normung DIN EN ISO 9241-11: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten [Buch]. - [s.l.] : Beuth Verlag, 1999.

Deutsches Institut für Normung Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen [Buch]. - Berlin : Beuth Verlag, 1981. - ISBN: 978-3-410-11474-1.

DIBt CFK-Aluminium-Verbundträger zum Einsatz in Zeltkonstruktionen [Buchabschnitt] // Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-26.2-53. - Berlin : Deutsches Institut für Bautechnik, 2010.

DIBt Verstärken von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen durch in Schlitzte schubfest mit "StoPox SK 41" eingeklebte "Sto S&P CFK Lamelle" [Buchabschnitt] // Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-36.12-67. - Berlin : Deutsches Institut für Bautechnik, 2006.

DIBt Verstärken von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen durch schubfest aufgeklebte Kohlefaserlamellen Carboplus [Buchabschnitt] // Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-36.12-57. - Berlin : Deutsches Institut für Bautechnik, 2007.

Dilthey U. Handhabungs- und Fügetechniken für die Klein- und Mittelserienfertigung [Buch]. - Aachen : Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005. - ISBN: 978-3-540-23706-8.

Dimmig-Osburg A. [et al.] Innovative Glas-Hybrid-Elemente für Gebäudehüllen - Verbesserung der Energieeffizienz mittels transluzenter Zwischenschichten [Buchabschnitt]. - Rosenheim : Rosenheimer Fenstertage, 2010.

Dimmig-Osburg A. und Bode K. Untersuchungen zum Benetzungsverhalten kunststoffmodifizierter Zementsteine [Buchabschnitt]. - [s.l.] : Zement-Kalk-Gips ZKG International, 2010.

Domininghaus H. Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen [Buch]. - Pfinztal : Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2008. - ISBN: 978-3-540-72400-1.

Dunky M. und Niemz P. Holzwerkstoffe Und Leime: Technologie Und Einflussfaktoren [Buch]. - Zürich : Springer Verlag, 2002. - ISBN: 978-3-540-42980-8.

Ehrenstein G. W. Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik [Buch]. - München : Carl Hanser Verlag, 2004. - ISBN: 978-3-446-22340-1.

Ehrenstein G. W. und Pongratz S. Die Beständigkeit von Kunststoffen. Band 1 [Buch]. - Erlangen : Carl Hanser Verlag, 2007. - ISBN: 978-3-446-21851-2.

Eindhoven University of Technology [Online]. - 2005. - www.mate.tue.nl.

Engeln-Müllges G., Niederdrenk K. und Wodicka R. Numerik-Algorithmen: Verfahren, Beispiele, Anwendungen [Buch]. - Aachen : Springer Verlag Heidelberg Dordrecht London New York, 2011. - ISBN: 978-3-642-13472-2.

Erdem E. Probabilistisch basierte Auslegung stahlfasermodifizierter Betonbauteile auf experimenteller Grundlage [Buch]. - [s.l.] : BoD - Books on Demand, 2002. - ISBN: 978-3-8311-4137-1.

Eschl J. Die mechanischen Eigenschaften von Stereolithographiematerialien während der Aushärtung [Buch]. - Stuttgart : Fakultät Verfahrenstechnik und Technische Kybernetik der Universität Stuttgart, 2001.

Europäischer Aluminium Verband (EAA) und Matter Werkstoffkunde [Online]. - 2011. - <http://aluminium.matter.org.uk>.

Eversheim W. und Schuh G. Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung [Buch]. - Aachen : Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2005. - ISBN: 978-3-540-21175-6.

Eyerer P., Hirth T. und Elsner P. Polymer Engineering: Technologien und Praxis [Buch]. - Pfinztal : Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008. - ISBN: 978-3-540-72402-5.

Fa. Brockhaus Brockhaus. Enzyklopädie [Buch]. - Mannheim : Brockhaus Verlag, 2007. - ISBN: 978-3765341403 .

Farsch D. Menschliches Leistungsvermögen [Buch]. - Köln : K.L.S. Publishing, 2010. - ISBN: 978-3-942095-01-3.

Flemming M. und Roth S. Faserverbundbauweisen. Eigenschaften: Mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte [Buch]. - Markdorg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003. - ISBN: 978-3-540-00636-7.

Flemming M., Ziegmann G. und Roth S. Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices [Buch]. - Zürich : Springer Verlag Berlin, Heidelberg New York, 1995. - ISBN: 978-3-540-58645-8.

Fourné F. Synthetische Fasern: Herstellung, Maschinen und Apparate, Eigenschaften [Buch]. - Wien : Hanser Verlag, 1995. - ISBN: 978-3-446-16058-2.

Füssinger R. Zugstab zur Verwendung als Gurt in Brücken, dessen Mittelteil aus Faserverbundwerkstoff und dessen Enden aus metallischem Werkstoff bestehen und beide Teile mittels einer geklebten Schäftung verbunden sind [Patent]: DE 19828835 C1. - Deutschland, 29. Juli 1999.

Geiß P. L. [et al.] Leichtbau aus Metall und Faser-Kunststoff-Verbunden [Artikel] // Kunststoffe – Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. - 2007. - Ausgabe 97.

Geiß P. L. Anwendung und Realisierung klebtechnischer Hybridverbunde aus unterschiedlichen Werkstoffen [Buch]. - Jena : Technische Universität Kaiserslautern, 2006.

Geiß P. L. Wie sieht die Zukunft des Klebens aus? An was arbeiten die wissenschaftlichen und technischen Institute heute? Material Mix, Verbundwerkstoffe oder hochfester Stahl – wo geht die Reise hin? [Artikel] // Fachsymposium Kleben im Maschinenbau. - 2010.

Gerdas I., Klawonn F. und Kruse R. Evolutionäre Algorithmen: Genetische Algorithmen-Strategien und Optimierungsverfahren [Buch]. - Wiesbaden : Vieweg +Teubner, 2004. - ISBN: 978-3-528-05570-7.

Gesellschaft Deutscher Chemiker Liebigs Annalen der Chemie [Buch]. - 1980. - ISSN: 0170-2041.

Gieler R. P. und Dimmig-Osburg A. Kunststoffe für den Bautenschutz und die Betoninstandsetzung: Der Baustoff als Werkstoff [Buch]. - Fulda / Weimar : Birkhäuser Verlag Basel – Boston – Berlin, 2006. - ISBN: 978-3-7643-6345-2.

Göbel M. und Hildebrand J. Schweißen von Quarzglas: Numerische und experimentelle Untersuchungen [Buch]. - Weimar : VDM Verlag Dr. Müller, 2008. - ISBN: 978-3-8364-8158-8.

Göbel M. und Werner F. Faserverstärkte Klebstoffe – Betrachtung der Verbundtragwirkung [Buchabschnitt] // Verbundwerkstoffe / Buchverf. Krenkel Walter. - Bayreuth : WILEY-VCH, 2009. - ISBN: 978-3-527-32615-0.

Göbel M., Hildebrand J. und Werner F. Glas-Kunststoff-Hybridelemente – Einsatz und Werkstoffeigenschaften [Buchabschnitt] // Verbundwerkstoffe / Buchverf. Krenkel Walter. - Bayreuth : WILEY-VCH, 2009. - ISBN: 978-3-527-32615-0.

Golz H. U., Altena U. und Kortmann P.-E. <http://www.berstorff.de/> [Online]. - KraussMaffei Berstorff GmbH , 2011.

Graf M. Untersuchung zum hochfesten und witterungsbeständigen Kleben von Floatglas [Buch]. - Kaiserslautern : Universität Kaiserslautern, 2004. - Bd. Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik.

Graf W. und Vassilev T. Einführung in computerorientierte Methoden der Baustatik [Buch]. - Dresden : Ernst & Sohn Verlag, 2006. - ISBN: 978-3-433-01857-6.

Graubner C.-A. und Hüske K. Nachhaltigkeit im Bauwesen [Buch]. - Berlin : Ernst & Sohn, 2003. - ISBN: 978-3-433-01512-0.

Grellemann W. Kunststoffprüfung [Buch]. - München, Wien : Carl Hanser Verlag, 2005. - ISBN: 978-3-446-22086-0.

Griffith A The Phenomena of Rupture and Flow in Soils [Buch]. - London : Phil. Trans. Roy. Soc., 1920.

Groth C. FEM für Praktiker: Grundlagen [Buch]. - Renningen : expert verlag, 2007. - ISBN: 978-3-8169-2685-6.

Grübl P., Weigler H. und Sieghart K. Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften [Buch]. - Darmstadt : Ernst & Sohn Verlag, 2001. - ISBN: 978-3-433-01340-3.

Grunwald A. und Kopfmüller J. Nachhaltigkeit [Buch]. - Frankfurt/Main : Campus, 2006. - ISBN: 978-3-593-37978-4.

Gümpel P. Rostfreie Stähle: Grundwissen, Konstruktions- und Verarbeitungshinweise [Buch]. - Renningen : expert verlag, 2008. - ISBN: 978-3-8169-2689-4.

Gutierrez T. E. Experimental Analysis of the Shear Transfer Mechanism in a Composite Bridge Beam Manufactured from Advanced Polymer Composites [Buch]. - Ispra : JRC Scientific and Technical Reports, 2005.

Gypser A. [et al.] Glas-Kunststoff-Sandwichelemente mit transluzenten Zwischenschichten [Buchabschnitt]. - Ilmenau : Thüringer Werkstofftag, 2010.

Habenicht G. Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen [Buch]. - Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2009. - ISBN: 978-3-540-85264-3.

Hagedorn P. Technische Mechanik: Festigkeitslehre, Band 2 [Buch]. - Frankfurt a. M. : Wissenschaftlicher Verlag Harry Deutsch, 2006. - ISBN: 978-38171-1778-9.

Hamabe K. [et al.] Form und Verfahren zum Formpressen von faserverstärkten Kunststoffteilen [Patent] : DE68918186T2. - 12. Januar 1995.

Hamada H. Verfahren zur Verbindung von faserverstärkten Kunststoffstrukturen mit vulkanisiertem Gummi [Patent] : DE69127216T2. - Japan, 29. Januar 1991.

Hau E. Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit [Buch]. - Krailling : Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008. - ISBN: 978-3-540-72150-5.

Haubelt C. Digitale Hardware/Software-Systeme: Spezifikation und Verifikation [Buch]. - Erlangen : Springer Verlag, 2011. - ISBN: 978-3-642-05355-9.

Heene G. Baustelle Pantheon. Planung - Konstruktion - Logistik [Buch]. - Kaiserslautern : VBT Verlag Bau u. Technik, 2008. - ISBN: 978-3-7640-0481-1.

Henn C. Faserbewehrtes Granulat zum Spritzgiessen von Formteilen und ein Verfahren zur Herstellung von faserbewehrtem Granulat [Patent] : EP0865891. - Deutschland, 29. Oktober 1998.

Hennecke M. [et al.] Kohlefasertragelement ummantelt mit ultrahochfestem Beton [Patent] : DE202005003093U1. - Deutschland, 20. Oktober 2005.

Herning E. und Modler K.-H. Grundwissen des Ingenieurs [Buch]. - Aalen : Carl Hanser Verlag, 2007. - ISBN: 978-3-446-22814-6.

Hess R. Glasträger: Forschungsbericht [Buch]. - Zürich : vdf Hochschulverlag AG, 2000. - ISBN: 978-3-7281-2730-2.

Hesse W. Aluminium-Werkstoffdatenblätter [Buch]. - Düsseldorf : Aluminium-Verlag, 2007. - ISBN: 978-3-87017-287-8.

Hildebrand J. Numerische Schweißsimulation – Bestimmung von Temperatur, Gefüge und Eigenspannung an Schweißverbindungen aus Stahl und Glaswerkstoffen [Buch]. - Weimar : Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, 2008. - ISBN: 978-3-86068-379-8.

Hildebrand J., Werner F. und Zimmerer K. Load-Bearing Glass-Plastic Hybrid Elements [Buch]. - München : International Symposium on the Application of Architectural Glass (ISAAG 2008), 2008.

Hofmann H. und Spindler J. Verfahren der Oberflächentechnik [Buch]. - Mittweida : Fachbuchverlag Leipzig, 2004. - ISBN: 978-3-446-22228-6.

Hollemann A. F. und Wiberg N. Lehrbuch der anorganischen Chemie [Buch]. - Berlin : Verlag Walter de Gruyter, 1995. - ISBN: 978-3-11-012641-9.

Huntsmann Structural Adhesives [Buch]. - Schlangenbad : Huntsman Advanced Materials, 2004.

Informationsstelle Edelstahl Rostfrei Merkblatt 821 / Edelstahl rostfrei – Eigenschaften [Bericht]. - Düsseldorf : Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 4. Aufl. 2006.

Jeromin G. Organische Chemie [Buch]. - Aachen : Harri Deutsch Verlag, 2006. - ISBN: 978-3-8171-1732-1.

Johannaber F. und Michaeli W. Handbuch Spritzgießen [Buch]. - Aachen : Carl Hanser Verlag, 2004. - ISBN: 978-3-446-22966-3.

Kaesche H. Die Korrosion der Metalle [Buch]. - Erlangen Nürnberg : Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1990. - ISBN: 978-3-540-51569-0.

Kaiser H. Wind-Ertüchtigung statisch ausgenutzter Holzdächer zur Aufnahme angestellter Solarpaneele mittels in Schlitze geklebter CFK-Lamellen [Buch]. - Berlin : epubli GmbH, 2010. - ISBN: 978-3-86931-665-9.

Kaiser W. und König W. Geschichte des Ingenieurs: ein Beruf in sechs Jahrtausenden [Buch]. - Aachen und Berlin : Carl Hanser Verlag München Wien, 2006. - ISBN: 978-3-446-40484-7.

Kalweit A. [et al.] Handbuch für technisches Produktdesign: Material und Fertigung; Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure [Buch]. - Bremen : Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2006. - ISBN: 978-3-540-21416-8.

Kessler C. Numerische Simulation geklebter Stahlverbundkonstruktionen [Buchabschnitt] // DAST-Kolloquium, Tagungsband. - Weimar : Deutscher Ausschuss für Stahlbau DAST, 2010. - ISBN: 978-3-929371-20-8.

Kessler C. und Kurz W. Beitrag zur FE-Simulation geklebter Beton-Stahl-Verbindungen [Buchabschnitt] // DAfStb Forschungskolloquium. - Kaiserslautern : DAfStb, 2010.

Kindmann R. und Stracke M. Verbindungen im Stahl- und Verbundbau [Buch]. - Bochum : Ernst & Sohn, 2009. - ISBN: 978-3-433-02916-9.

Kinseher R. Der Bogen in Kultur, Musik und Medizin, als Werkzeug und Waffe [Buch]. - Kehlheim : Books on Demand GmbH, 2003. - ISBN: 978-3-8311-4109-6.

- Kitano A. [et al.]** Verbundmaterial aus Leichtmetall und mit Kohlenstofffasern verstärktem Kunststoff [Patent] : PCT/JP98/03690. - Japan, 06. Juni 2007.
- Klappenbach R. und Steinitz W.** Wörterbuch der deutschen Gegenwartssprache [Buch]. - [s.l.] : Deutsche Akademie der Wissenschaften in Berlin, 2005. - ISBN: 978-3-484-39121-5.
- Klein B.** Leichtbau-konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung [Buch]. - Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2011. - ISBN: 978-3-8348-1604-7.
- Kolax M. [et al.]** Rumpf eines Luft- oder Raumfahrzeuges in CFK-Metall Hybridbauweise mit einem Metallrahmen [Patent] : DE102007003277A1. - Deutschland, 24. Juli 2008.
- Kolb J.** Holzbau mit System: Tragkonstruktion und Schichtaufbau der Bauteile [Buch]. - Uttwil : Birkhäuser Architektur, 2008. - ISBN: 978-3-7643-8823-4.
- Körtgen M.** Optimierungsansätze zur prozessorientierten Abwicklung komplexer Baumaßnahmen unter Einsatz neuer Informations- und Kommunikationssysteme [Buch]. - Kassel : kassel university press, 2010. - ISBN: 978-3-89958-928-3.
- Köster H.** Glasfassaden [Patent] : DE102007058931A1. - Deutschland, 18. Juni 2009.
- Kott A.** Zum Trag- und Resttragverhalten von Verbundsicherheitsglas [Buch]. - Zürich : vdf Hochschulverlag AG, 2007. - ISBN: 978-3-7281-3131-7.
- Krenkel W.** Keramische Verbundwerkstoffe [Buch]. - Stuttgart : Wiley-VCH, 2003. - ISBN: 978-3-527-30529-7.
- Krenkel W.** Verbundwerkstoffe [Buch]. - Bayreuth : Universitätsverlag Bayreuth, 2009. - ISBN: 978-3-527-32615-0.
- Kromidas S.** Handbuch Validierung in der Analytik [Buch]. - Saarbrücken : Wiley-VCH, 2011. - ISBN: 978-3-527-32938-0.
- Kühler M.** Verbundmittel für Hybridkonstruktionen mit Ultrahochleistungsbeton [Buch]. - Leipzig : Books on Demand GmbH, 2009. - ISBN: 978-3-8391-0528-3.
- Kuchling H.** Taschenbuch der Physik [Buch]. - Mittweida : Fachbuchverlag Leipzig, 2004. - ISBN: 978-3-446-22883-7.
- Kuhlmann U. [et al.]** Wirtschaftliche Schweißverbindungen höherfester Baustähle [Buch]. - Düsseldorf : Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. -FOSTA-, Düsseldorf, 2008. - ISBN: 978-3-937567-69-3.
- Kurek R.** Erfolgsstrategien für Automobilzulieferer: Wirksames Management in einem dynamischen Umfeld [Buch]. - München : Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004. - ISBN: 978-3-540-20885-2.
- Lange G. und Pohl M.** Werkstoffprüfung: Schadensanalyse und Schadensvermeidung [Buch]. - Bad-Nauheim : Wiley-VCH, 2001. - ISBN: 978-3-527-30538-6.
- Lange J. [et al.]** Stahlleichtbau mit Verbundelementen [Buchabschnitt] // Stahlbau (79). - Weimar : Ernst & Sohn, 2010.
- Lees W. A.** Adhesives in engineering design [Buch]. - Berlin : Springer Verlag, 1984. - ISBN: 978-3-540-15024-4.
- Lemken T. [et al.]** Stahl – ein Werkstoff mit Innovationspotenzial: Ergebnisse des "Zukunftsdialogs Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung" [Buch]. - Wuppertal : Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2008.

Leutbecher T. Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem Ultrahochfesten Beton (UHPC) [Buch]. - Kassel : Kassel University Press, 2008. - ISBN: 978-3-89958-374-8.

Lohmeyer Gottfried C. O., Ebeling K. und Bergmann H. Stahlbetonbau: Bemessung-Konstruktion-Ausführung [Buch]. - Wiesbaden : Vieweg +Teubner, 2010. - ISBN: 978-3-8348-0866-0.

Lüders K. und Pohl R. O. Pohls Einführung in die Physik Band 1 [Buch]. - Berlin : Springer Verlag, 2009. - ISBN: 978-3-540-76337-6.

Madenci E. und Guven I. The Finite Element Method and Applications in Engeneering Using ANSYS [Buch]. - Arizona, USA : Springer Science+Business Media, 2006. - ISBN: 0-387-28289-0.

Makkie H. E. Green Building: Nachhaltigkeitszertifikate im Bausektor: Konsequenzen für Bau- und Immobilienwirtschaft [Buch]. - [s.l.] : Diplomica Verlag, 2010. - ISBN: 978-3-8366-9133-8.

Mang H. und Hofstetter G. Festigkeitslehre [Buch]. - Innsbruck : Springer-Verlag GmbH, Wien, New- York, 2004. - ISBN: 978-3-211-21208-6.

Marschall L. Im Schatten der chemischen Synthese: industrielle Biotechnologie in Deutschland [Buch]. - Frankfurt/Main : CampusVerlag GmbH, 2000. - ISBN: 978-3-593-36585-5.

Mattes Kurt Methoden zur Charakterisierung des nichtlinear viskoelastischen Verhaltens von Polymerschmelzen [Buch]. - Freiburg : Freiburger Dokumentenserver, 2007.

Mehlhorn G. Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten [Buch]. - Kassel : Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010. - ISBN: 978-3-642-04422-9.

Meier M. Entwurfs-Prozess, the key to innovation [Buch]. - Zürich : Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2002.

Meier U. und Zierl B. Starke und elegante Brücken dank Faserverbundwerkstoffen [Buch]. - Dübendorf : Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, 2011.

Meier-Westhues U. Polyurethane [Buch]. - Hannover : Vincentz Network GmbH & Co KG, 2007. - ISBN: 978-3-86630-896-1.

Meinz J. Betrachtungen zum Trag- und Verformungsverhalten und zum Nachweis geklebter Trapezprofilanschlüsse und verstärkter Hohlprofile in Pfosten-Riegel-Fassaden [Buch]. - Berlin : Weißensee Verlag Berlin, 2010. - ISBN: 978-3-89998-184-1.

Meinz J. und Pasternak H. Zum vereinfachten rechnerischen Nachweis von Klebverbindungen im Stahlbau [Journal] // Bauingenieur Jg.: 86 Nr. 6. - Düsseldorf : Springer VDI Verlag, 2011. - Bd. Jg.: 86 Nr. 6. - ISSN: 0005-6650.

Menges G. [et al.] Werkstoffkunde Kunststoffe [Buch]. - Aachen : Hanser Verlag, 2002. - ISBN: 978-3-446-21257-2.

Michaeli W., Brinkmann T. und Lessenich-Henkys V. Kunststoff-Bauteile werkstoffgerecht konstruieren [Buch]. - München Wien : Carl Hanser Verlag, 1995. - ISBN: 978-3-446-17535-0.

Moeller E. Handbuch Konstruktionswerkstoffe: Auswahl, Eigenschaften, Anwendung [Buch]. - München : Hanser Verlag, 2008. - ISBN: 978-3-446-40170-9.

- Moro J. L. [et al.]** Baukonstruktion- Vom Prinzip Zum Detail: Band 1 Grundlagen [Buch]. - Stuttgart : Springer Verlag, 2009. - ISBN: 978-3-540-40613-6.
- Moser K.** Faser-Kunststoff-Verbund: Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen [Buch]. - Düsseldorf : VDI-Verlag, 1992. - ISBN: 978-3-18-401187-9.
- Müller H. S., Nolting U. und Haist M.** Beherrschung von Rissen in Beton : Symposium; 7. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung [Buch]. - Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2010. - ISBN: 978-3-86644-487-4.
- Nasdala L.** FEM-Formelsammlung in Statik und Dynamik: Hintergrundinformationen, Tipps und Tricks [Buch]. - Wiesbaden : Vieweg +Teubner, 2010. - ISBN: 978-3-8348-0980-3.
- Neff J.** Panzerglasscheibe und Verfahren zur Herstellung einer Panzerglasscheibe [Patent] : DE 100 48 566 B4. - 21. Juli 2005.
- Neitzel M. und Mitschang P.** Handbuch Verbundwerkstoffe [Buch]. - Kaiserslautern : Carl Hanser Verlag München Wien, 2004. - ISBN: 978-3-446-22041-0.
- Neuhaus H.** Ingenieurholzbau [Buch]. - Münster : Vieweg +Teubner, 2009. - ISBN: 978-3-519-15248-4.
- Ninck M.** Zauberwort Nachhaltigkeit [Buch]. - Zürich : vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1997. - ISBN: 978-3-7281-2341-2.
- Oppler D.** Aufsätze zur Archäologie: Band 1 2009/10 [Buch]. - Norderstedt : GRIN Verlag, 2010. - ISBN: 978-3-640-47158-8.
- Pasternak H. und Ciupack Y.** Kalibrierung von Bemessungskonzepten gemäß Eurocode am Beispiel von Klebverbindungen [Journal]. - Düsseldorf : Springer-VDI-Verlag, 2012. - Bde. Jg.: 87, Nr.3. - S. S. 116-123. - ISSN: 0005-6650.
- Pasternak H. und Mainz J.** Kleben im Stahlbau - zwei Beispiele aus dem Fassadenbau [Artikel] // Bauingenieur. - 2007. - Ausgabe 82.
- Pasternak H., Hannebauer D. und Zapf G.** Untersuchungen zur Verstärkung von Stahlbauten durch kohlenstoffverstärkten Kunststoff (CFK) [Buchabschnitt] // Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik. - Düsseldorf : Stahl-Zentrum Düsseldorf, 2003.
- Pasternak H., Hoch H.-U. und Füg D.** Stahltragwerke im Industriebau [Buch]. - Berlin : Ernst W. + Sohn Verlag, 2010. - ISBN: 978-3-433-01849-1.
- Petersen C.** Stahlbau [Buch]. - Braunschweig : Vieweg Verlag, 1993. - ISBN: 978-3-528-28837-9.
- Petersen D.** Industrielle Umweltkostenrechnung [Buch]. - Göttingen : Cuvillier Verlag, 2004. - ISBN: 978-3-86537-066-7.
- Pfeifer T. und Schmitt R.** Fertigungsmeßtechnik [Buch]. - München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2010. - ISBN: 978-3-486-59202-3.
- Pfeifer W.** Etymologisches Wörterbuch des Deutschen [Buch]. - Frankfurt : dtv-Taschenbücher, 1997. - ISBN: 978-3-423-32511-9.
- Pfyl T.** Tragverhalten von Stahlfaserbeton [Buch]. - Zürich : Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2003. - ISBN: 978-3-7281-2892-9.
- Pieplow K.** Untersuchungen zum Tragverhalten CFK-verstärkter Stahlbetonbauteile [Buch]. - Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2005. - ISBN: 978-3-8167-6983-5.

- Pörtner C.** Untersuchungen zum Verbund zwischen eingeklebten stiftförmigen faserverstärkten Kunststoffen und Holz [Buch]. - Kassel : university press GmbH, Kassel, 2005. - ISBN: 978-3-89958-191-1.
- Prammer K. H.** Integriertes Umweltkostenmanagement [Buch]. - Wien : Gabler Verlag, 2009. - ISBN: 978-3-8349-1690-7 .
- Proske D.** Ein Beitrag zur Risikobeurteilung von alten Brücken unter Schiffsanprall [Buch]. - Dresden : Technische Universität Dresden, 2003.
- Proske D.** Sicherheit und Risiko im Bauwesen [Buch]. - Dresden : Dirk Proske Verlag, 2004. - ISBN: 978-3-00-019235-7.
- Proske D., Mehdiانpour M. und Gucma L.** 4th International Probabilistic Symposium [Buch]. - Berlin : BAM, 2006. - ISBN: 978-3-00-019232-6.
- Rabe M., Spieckermann S. und Wenzel S.** Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik [Buch]. - Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. - ISBN: 978-3-540-35281-5.
- Radaj D.** Schweißprozesssimulation: Grundlagen und Anwendung [Buch]. - Düsseldorf : DVS-Verlag, 1999. - ISBN: 978-3-87155-188-0.
- Rauh C.** Schweizer Aluminium für Hitlers Krieg?: Zur Geschichte der Alusuisse 1918-1950 [Buch]. - Hannover : Verlag C.H.Beck, 2009. - ISBN: 978-3-406-52201-7.
- Rautenstrauch K., Mueller J. und Simon A.** The first timber-concrete composite road bridge in germany [Buch]. - Riva del Garda : World Conference on Timber Engineering, 2010.
- Reinhardt H.-W.** Ingenieurbaustoffe [Buch]. - Stuttgart : Wilhelm ernst & Sohn Verlag, 2012. - ISBN: 978-3-433-02920-6.
- Rice P. und Dutton H.** Transparente Architektur: Glasfassaden mit Structural Glazing [Buch]. - Basel : Birkhäuser, 1995. - ISBN: 978-3-764-35135-9.
- Röder H.** Neue Zeltkonstruktionen Carbon mit Alu [Buchabschnitt]. - Kefenrod : Röder HTS Höcker GmbH, 2010.
- Röder H.** Stütz- und Verbindungsprofil [Patent] : PTC/EP00/10191. - Deutschland, 28. Juni 2001.
- Römer T.** Verstärkung von Betonbauteilen durch duktile Hochleistungswerkstoffe [Buch]. - Leipzig : GRIN Verlag, 2002. - ISBN: 978-3-638-12020-1.
- Roos E. und Maile K.** Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung [Buch]. - Stuttgart : Springer Verlag, 2011. - ISBN: 978-3-642-17463-6.
- Rosato D. [et al.]** Plastics Institute of America Plastics Engineering, Manufacturing & Data Handbook [Buch]. - Massachusetts : Plastic Institute of America, 2001. - ISBN: 978-0-7923-7316-2.
- Rose P.G.** Hochfeste Kohlenstofffasern: Herstellung und Eigenschaften [Buchabschnitt] // Kohlenstoff- und aramidfaserverstärkte Kunststoffe / Buchverf. Kunststofftechnik Gesellschaft. - Düsseldorf : VDI-Verlag, 1977. - ISBN: 978-3-18-404027-5.
- Rösler J., Harders H. und Bäker M.** Mechanisches Verhalten der Werkstoffe [Buch]. - Braunschweig : Vieweg +Teubner, 2006. - ISBN: 978-3-8351-0008-4 .

Ruge J. und Wohlfahrt H. Technologie der Werkstoffe [Buch]. - Braunschweig : Vieweg & Sohn, 2002. - ISBN: 978-3-528-63021-3.

Rust W. Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen: Kontakt, Geometrie, Material [Buch]. - Hannover : Vieweg + Teubner, 2009. - ISBN: 978-3-8351-0232-3.

Ruth J., Gump R. und Heidenreich C. AFAS - Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für adaptive Systeme [Buch]. - Essen : Forschungsforum der Forschungsinitiative Zukunft Bau (BBSR), 2010.

SAS IP, Inc. ANSYS Help [Buch]. - Canonsburg : [s.n.], 2010.

Schäfer H. Klebtechnik – Die Schlüsseltechnologie für den Vorsprung im Wettbewerb [Buchabschnitt]. - Bremen : IFAM Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung – Klebtechnik und Oberflächen –, 2008.

Schäfer W. Frankreichs gotische Kathedralen : eine Reise zu den Höhepunkten mittelalterlicher Architektur in Frankreich [Buch]. - Köln : DuMont, 1990. - Bde. ISBN: 978-3-7701-0975-9.

Scheider L. Beitrag zur Berechnung des Trag- und Formänderungsverhaltens von Sandwichfaltwerken [Buch]. - Weimar : Hochschule für Architektur und Bauwesen, 1975.

Schilde K. und Seim W. Untersuchungen zum Verbund zwischen Beton und nachträglich aufgeklebten CFK-Lamellen am Zwischenrisselement [Buch]. - Kassel : Kassel University Press, 2005. - Bd. Schriftenreihe Bauwerkserhaltung und Holzbau. - ISBN: 978-3-89958-149-2.

Schilling S. Beitrag zur Lösung ingenieurtechnischer Entwurfsaufgaben unter Verwendung Evolutionärer Algorithmen [Buch]. - Weimar : Bauhaus-Universität Weimar, 2004.

Schittich C. [et al.] Glasbau Atlas [Buch]. - Dresden : Technische Universität Dresden, 2006. - ISBN: 978-3-7643-7632-1.

Schmidt M. Ultra High Performance Concrete (UHPC): Zehn Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel [Buch]. - Kassel : kassel university press GmbH, 2007. - ISBN: 978-3-89958-347-2.

Schmidt M. Ultra-hochfester Beton Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa [Buch]. - Kassel : kassel university press GmbH, 2003. - ISBN: 978-89958-518-6.

Schmiedel K. Bauen und Gestalten mit Stahl: Entwerfen, Konstruieren, Erhalten [Buch]. - Renningen-Malmsheim : expert-Verlag, 1995. - ISBN: 978-3-8169-0952-3.

Schorning M. Transparenter Mehrschicht-Verbund [Patent] : DE10017035A1. - Deutschland, 11. Oktober 2001.

Schröder M. Schutz und Instandsetzung von Stahlbeton: Anleitung zur sachkundigen Planung [Buch]. - Renningen : expert verlag, 2009. - ISBN: 978-3-8169-2925-3.

Schüco Fassadenelemente Produktkatalog [Buch]. - Bielefeld : Schüco International KG, 2008.

Schürmann H. Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden [Buch]. - Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007. - ISBN: 978-540-72189-5.

Seiffert A. Autonomie und Isonomie fremder und indigener Wortbildung [Buch]. - Berlin : Frank & Timme GmbH, 2008. - ISBN: 978-3-86596-141-9.

Seim W. Bewertung und Verstärkung von Stahlbetontragwerken [Buch]. - Kassel : Ernst & Sohn Verlag, 2007. - ISBN: 978-3-433-01817-0.

Shukla A., Ravichandran G. und Rajapakse Y. Dynamic Failure of Materials and Structures [Buch]. - London : Springer Verlag, 2010. - ISBN: 978-1-4419-0446-1.

Siebert G. Entwurf und Bemessung von tragenden Bauteilen aus Glas [Buch]. - Berlin : Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, 2001. - ISBN: 978-3-433-01614-3.

Sika Technisches Merkblatt [Buch]. - Bludenz : Sika-Plastiment GmbH, 2003.

Silber G. und Steinwender F. Bauteilberechnung und Optimierung mit der FEM [Buch]. - Wiesbaden : Teubner Verlag, 2005. - ISBN: 978-3-519-00425-9.

Simon A. und Rautenstrauch K. Die Birkbergbrücke Wippra - Deutschlands erste Straßenbrücke in Holz-Beton-Verbundbauweise [Buchabschnitt] // Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken / Buchverf. Brückenbausymposium Tagungsband 19. Dresdner. - Dresden : Technische Universität Dresden, 2009.

Sommitsch C. Multiskalen Modellierung von technischen Metallen unter thermomechanischer Belastung [Buch]. - Graz : Frank Stronach Institut, 2010. - Bd. SIMNET DAYS 2010.

Spaethe G. Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen [Buch]. - Berlin : Springer Verlag Berlin, 1992. - ISBN: 978-3-211-82348-4.

Straub H. Die Geschichte der Bauingenieurkunst: ein Überblick von der Antike bis in die Neuzeit [Buch]. - Berlin : Birkhäuser Verlag, 1996. - ISBN: 978-3-7643-2441-4.

Tomczyk L. Bauen mit Licht [Buch]. - Lohr a. Main : Geschichts- und Museumsverein (Lohr), 2004. - ISBN: 978-3-934128149.

Trzesniowski M. Rennwagenteknik [Buch]. - Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2010. - ISBN: 978-3-8348-0857-8.

Valtinat G. Aluminium im Konstruktiven Ingenieurbau [Buch]. - Hamburg-Harburg : Ernst & Sohn Verlag, 2003. - ISBN: 978-3-433-01784-0.

Verein Deutscher Eisenhüttenleute Stahl und Eisen [Buch]. - 1956. - Bd. Band 76.

Weber H. Fassadenschutz und Bausanierung: Der Leitfaden für die Sanierung, Konservierung und Restaurierung von Gebäuden [Buch]. - Renningen-Malmsheim : expert verlag, 1994. - ISBN: 978-3-8169-0690-2.

Weller B. [et al.] Glasbau-Praxis: Konstruktion und Bemessung [Buch]. - Dresden : Bauwerk Verlag GmbH, 2010. - ISBN: 978-3-89932-281-1.

Wellershoff F. Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebäudehüllen, Ph.D thesis. - RWTH Aachen : Shaker Verlag, 2006.

Wendler-Kalsch E. und Gräfen H. Korrosionsschadenkunde [Buch]. - Heidelberg : Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1998. - ISBN: 978-3-540-64750-3.

Wendt K. Der Wirkzusammenhang zwischen Knotengestaltung und Eigenschaften von PKW-Karosserien [Buch]. - Wolfsburg/Braunschweig : Logos Verlag Berlin GmbH, 2009. - ISBN: 978-3-8325-2284-1.

- Werner F. [et al.]** Untersuchungen an transparent geklebten Glas-Kunststoff-Hybridelementen für tragende Bauteile - GKH [Buchabschnitt] // Abschlussbericht zum DFG-Forschungsvorhaben BA 3154/2-1; BE 1875/18-1; WE 1475/6-1; WE 3636/3-1. - Weimar : Bauhaus-Universität Weimar, 2010.
- Werner F.** Eine Vollglaskonstruktion - Möglichkeiten und Probleme [Buchabschnitt] // Stahlbau. - [s.l.] : Ernst & Sohn Verlag, 2004. - Bd. Band 73 Heft 11.
- Werner F.** Neuartige Klebtechniken für Elemente im Fassadenbau [Buchabschnitt]. - Berlin : AIF / PRO INNO, 2008.
- Werner F. und Dilger K.** Faserverstärkte Klebstoffe im Bauwesen FibrAdh [Buch]. - Weimar, Braunschweig, Aachen : AIF Forschungsvorhaben der Bauhaus-Universität Weimar und der Technischen Universität Braunschweig, 2011.
- Werner F. und Hildebrand J.** Profil aus Glas-Kunststoff-Verbund. - Weimar : Bauhaus-Universität Weimar Dezernat Forschungstransfer und Haushalt, 2006. - DE102004050214A1.
- Werner F.** Wintergarten - Experimentalbau [Buchabschnitt]. - Leipzig : Gebaute Visionen aus Glas - Akademie der Architekten, 2004.
- Werner F., Zimmermann E. und Batzke U.** Neuartige Klebtechniken für Elemente im Fassadenbau [Buchabschnitt] // Forschungsbericht AIF-ProInno Projekt. - Weimar : [s.n.], 2008.
- Wiegand H., Kloss K.-H. und Thomala W.** Schraubenverbindungen: Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung [Buch]. - Seeheim-Jugenheim : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. - ISBN: 978-3-540-21282-9.
- Wiese S.** Verformung und Schädigung von Werkstoffen der Aufbau- und Verbindungstechnik [Buch]. - Halle : Springer Verlag Heidelberg Dordrecht London New York, 2010. - ISBN: 978-3-642-05462-4.
- Wietek B.** Stahlfaserbeton: Grundlagen und Praxisanwendung [Buch]. - Wiesbaden : Vieweg +Teubner Verlag, 2010. - ISBN: 978-3-83480-0872-1.
- Wörner J.-D., Schneider J. und Fink A.** Glasbau: Grundlagen, Berechnung, Konstruktion [Buch]. - Darmstadt : Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001. - ISBN: 978-3-540-66881-0.
- Xu X.-P. and Needleman, A.** Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids [Article]. - 1994. - Vols. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 42. - pp. 1397-1434.
- Zepf H.-P.** Faserverbundstoffe mit thermoplastischer Matrix.: Hochleistungswerkstoffe für rationelle Verarbeitung [Buch]. - Renningen-Malmsheim : expert verlag, 1997. - ISBN: 978-3-8169-1390-3.

8.2 Eigene Veröffentlichungen

Seres, N., Dunai, L., Göbel M.:

Investigation on the Effect of 3D Cold Forming; Experimental and Numerical Analyses.

In: EUROSTEEL 2011, August 31 - September 2, 2011, Budapest, Hungary, S. 147-152, ISBN: 978-92-9147-103-4.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F., Müller, H., Schmidt, Th., Bliedtner, J.:

Schweißen von Glas mittels Laserstrahl - Potenzial für neue Anwendungsgebiete.

In: Tagungsband, Thüringer Werkstofftag 2010, 24. März 2010, Ilmenau, S. 203 - 208.

Hildebrand, J., Göbel, M., Wittor, B., Werner, F.:

Schweißen und Schneiden von Glas mittels Laserstrahl – Potenzial der numerischen Simulation.

In: Tagungsband: SYSWELD Forum 2009, 22.-23. Oktober 2009, Weimar, S. 115-129.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Glas-Kunststoff-Hybridelemente – Einsatz und Werkstoffeigenschaften.

In: 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 01. – 03. April 2009, Bayreuth, S. 578-584, ISBN: 978-3-527-32615-0.

Werner, F., Göbel, M., Hildebrand, J.:

Numerische Analyse geschweißter Verbindungen von Duplexstahl und Quarzglas.

In: Stahlbau 78 (2009) 3, S. 180-187, ISSN 0038-9145.

Göbel, M., Werner, F.:

Faserverstärkte Klebstoffe – Betrachtung der Verbundtragwirkung.

In: 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 01. – 03. April 2009, Bayreuth, ISBN: 978-3-527-32615-0.

Göbel, M.; Werner, F.:

Laserstrahlschweißen von Quarzglas / Simulationsmöglichkeiten.

In: Zukunft Glas, Von der Tradition zum High-Tech-Produkt, S. 153-162, OTTI Symposium 04.-05. Juni 2008 Zwiesel.

Göbel, M.; Hildebrand; J.:

Schweißen von Quarzglas – Numerische und experimentelle Untersuchungen.

VDM Verlag 2008; ISBN: 978-3-8364-8158-8.

Göbel, M.; Werner, F.:

Experimentelle und numerische Untersuchung einer Fensterrahmenecke.

In: Workshop "Computergestützte Simulation", 25. Juli 2007, Weimar.

Göbel, M.; Hildebrand, J.; Werner, F.:

Advantages of FE-Simulation for the Development of a Welding Procedure for Quartz Glass.

In: GLASS PERFORMANCE DAYS 2007, 15-18. June 2007, Tampere, Finland S. 733-737, ISBN: 952-91-8674-6.

Göbel, M.; Hildebrand, J.; Werner, F.:

Glass-Plastic-Hybrid Construction.

In: GLASS PERFORMANCE DAYS 2007, 15-18. June 2007, Tampere, Finnland S. 355-358, ISBN: 952-91-8674-6.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Numerisches Modell für die Simulation einer Laserstrahlschweißung von Quarzglas.

IKM Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen 2006, ISSN 1661-4085 2006.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

The Simulation of Laser Beam Welding of Silica Elements.

In: Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, June 14–16, 2006, Montreal, Canada, S. 2025-2034, ISBN: 2-921145-58-8.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Numerisches Modell für die Simulation einer Laserstrahlschweißung von Quarzglas.

In: IKM Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen 2006, 12.–14. Juli 2006, Weimar, ISSN 1661-4085.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Laser Beam Welding on Quartz Glass Elements.

In: Numerical Analysis of Weldability, 25. – 27. September 2006 Graz – Seggau.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Die Anwendung des Laserstrahlschweißens als Fügetechnik für Bauteile aus Quarzglas.

In: DVS Berichte 2006, Lasertechnik – neue Entwicklungen und Anwendungen
ISBN: 3-87155-797-8; S 255-265.

Göbel, M., Hildebrand, J.:

Laserstrahlschweißen von Rohren aus Quarzglas.

In: 16. DAST Kolloquium Stahlbau S: 29-30, Stahlbau Verlags und Service GmbH, Düsseldorf, 2006, ISBN: 13 978-3-923726-80-6.

Müller, H., Schmidt, Th., Wächter, S., Bliedtner, J., Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Glasschweißen - Möglichkeiten durch den Einsatz von Laserstrahlen.

Glass welding - possibilities by using laser beams.

In: Konferenz-Einzelbericht: DVS-Berichte Band 240 (2006) S. 126-130.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F., Müller, H., Schmidt, Th., Wächter, S., Bliedtner, J.

Die Anwendung des Laserstrahlschweißens als Fügetechnik für Bauteile aus Quarzglas.

In: Konferenz-Einzelbericht: Lasertechnik – neue Entwicklung und Anwendungen, DVS-Berichte Band 241 (2006) S. 255-265.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Simulation einer Laserstrahlschweißung an einem Quarzglasstück.

In: Tagungsband: SYSWELD Forum 2005, 1. September 2005, Weimar, S. 67-76, ISBN: 3-86068-266-0.

FASER-KUNSTSTOFF-METALL-HYBRIDSYSTEME UND DEREN EINSATZ IN TRAGENDEN KONSTRUKTIONEN

Beitrag zur Entwicklung hocheffizienter struktureller Hybridsysteme
unter Anwendung moderner Faserwerkstoffe, Kunststoffe und Klebstoffe

Zusammenfassung

der Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor – Ingenieur
an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Michael Göbel
geboren am 19. Juni 1978
in Stendal

interner Doktorand

Mentor: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Werner, Bauhaus-Universität Weimar

Weimar, 02. Dezember 2012

Problemstellung und Zielsetzung

- 1) Die Entwicklung zukunftsfähiger und nachhaltiger Tragstrukturen im Bauwesen orientiert sich insbesondere an folgenden Kriterien:
 - Verwendung hochleistungsfähiger Werkstoffe, mit speziell auf den Anwendungsbereich zugeschnittenen Eigenschaften,
 - Optimierung der Querschnittsformen bezüglich Leistungsfähigkeit, d. h. i. Allg. Erzielung von hoher Tragfähigkeit und Steifigkeit bei geringem Gewicht,
 - Gewährleistung einer definierten Resttragfähigkeit bei lastabtragenden Systemen im Falle eines Versagens einzelner Strukturbereiche.
- 2) Die Entwicklung neuartiger und effizienter Tragstrukturen unter Nutzung nur eines Werkstoffes im Querschnitt ist systembedingt begrenzt hinsichtlich der:
 - Reduzierung von Bauteilmassen und -abmessungen unter Beibehaltung von Steifigkeit und Tragfähigkeit,
 - Wirtschaftlichkeits- und Nachhaltigkeitskriterien unter ganzheitlicher Betrachtung der Herstellung, Nutzung und Entsorgung.
- 3) Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung effektiver Tragelemente bzw. -strukturen mit hybriden Querschnitten, die neue Anwendungsgebiete im Bauwesen erschließen oder vorhandene erweitern (Hybrid: aus dem griechischen Hybrida; von zweierlei Herkunft, etwas Gemischtes).
- 4) Die Entwicklung und das Anwendungspotenzial von hybriden Tragstrukturen sollen im Rahmen dieser Arbeit für folgende Problemstellungen aufgezeigt werden:
 - Hybride, adhäsiv wirkende Kunststoffe aus Klebstoffen, Füllstoffen und Kunstfasern für die Übertragung definierter Zugspannungen,
 - Hybride Querschnitte aus Aluminium und Kohlenstoff, die eine signifikante Reduzierung der Bauteilmassen und -abmessungen ermöglichen,
 - Hybride, transparente Querschnitte aus Glas und Kunststoff, die im Fall eines eintretenden Glasbruches eine definierte, sicherheitstechnisch hinreichende Resttragfähigkeit aufweisen.
- 5) Die Anwendung hybrider Tragstrukturen kann an unterschiedlichen Beispielen dargestellt werden bei einer weitgehend verallgemeinerten Entwicklungs- und Bemessungsmethodik.

Stand von Forschung und Technik

- 6) Tragstrukturen mit Hohlprofilen aus metallischen Werkstoffen, wie z. B. Fensterrahmen, werden gegenwärtig sehr aufwändig unter Zuhilfenahme zusätzlicher Verbindungselemente aus Aluminium mechanisch verpresst und anschließend aus Dichtigkeitsgründen verklebt. Gesucht sind dort Klebtechnologien, die die Herstellung kraft- und formschlüssiger Verbindungen der Hohlprofile in einem Arbeitsgang erlauben.
- 7) Tragstrukturen aus Aluminium, wie weitgespannte Zeltsysteme, sind in einer Vielzahl von Hohlprofilformen herstellbar. Eine effektive Erhöhung der Steifigkeit und Tragfähigkeit dieser Elemente über verbesserte Materialeigenschaften oder optimierte Querschnittsformen ist kaum möglich.
- 8) Die Entwicklung von lastabtragenden Glassystemen wird aufgrund des spröden Materialverhaltens durch die notwendige Sicherstellung von Resttragfähigkeiten begrenzt. Dies

kann gegenwärtig nur durch einen unverhältnismäßig hohen Aufwand von Material sicherheitstheoretisch dargestellt werden.

- 9) Die Anwendung von faserverstärkten Kunststoffen, anorganischen oder organischen Fasern und transparenten Kunststoffen erfolgt gegenwärtig schwerpunktmäßig in Tragsystemen bzw. -elementen der Luftfahrt- und Automobilindustrie. Im Bauwesen ist der Einsatz aufgrund der spezifischen Sicherheitsanforderungen derzeit noch begrenzt.

Methodik

- 10) Die Herstellung hybrider Tragsysteme erfolgt durch eine Kopplung unterschiedlicher Materialien mittels problemspezifischer Klebverbindungen. Die Darstellung der Tragfähigkeit dieser Verbundsysteme erfordert den Einsatz analytischer, numerischer und experimenteller Methoden.
- 11) Die Materialauswahl wird durch ganzheitliche Kriterien der Herstellung, Nutzung und Entsorgung bestimmt. Dabei werden insbesondere Verträglichkeitsbedingungen der Werkstoffe untereinander analysiert.
- 12) Ausgehend von den Zielstellungen sind dabei drei unterschiedliche Vorgehensweisen gewählt worden:
- Kopplung von Hohlprofilen mittels eines Hybridwerkstoffs, bestehend aus Fasern, Füllstoff und Klebstoff, zur Herstellung einer volumenfüllenden Verbindung,
 - Kopplung von Alu-Querschnitten mit hochmoduligen Kohlefasern, in Form von CFK-Lamellen, mittels spezieller Klebstoffe zur Erzielung eines steifen Verbundquerschnittes (CFK: Kohlenstofffaserverstärkter-Kunststoff),
 - Kopplung spröder Glasquerschnitte mit niederm moduligen transparenten, viskoelastischen Kunststoffen mittels spezieller Klebstoffe zur Realisierung hoher Resttragfähigkeiten über einen langen Zeitraum.
- 13) Realitätsnahe Materialmodelle stellen eine wesentliche Grundlage der Modellqualität für theoretische Betrachtungen dar. Die Kalibrierung der Materialmodelle bildet dabei einen wesentlichen Arbeitsschritt. Das erfordert umfangreiche analytische, numerische und experimentelle Untersuchungen zu den herkömmlichen Grundwerkstoffen und den hinzugefügten Kunststoffen in Verbindung mit den gewählten Klebstoffen.
- 14) Die Untersuchungen werden untergliedert in Betrachtungen des Mikro-, Meso- und Makroskalenbereiches. Zu den Untersuchungen im Mikro/Mesoskalenbereich gehören:
- Lichtmikroskopische und REM- Analysen von Werkstoffen und deren Oberflächen als Grundlage einer Beurteilung und Optimierung hybrider Tragstrukturen und Adhäsionsverbindungen,
 - Numerische Analysen von Mikrogefügen unter verschiedenen Beanspruchungen zur strukturellen und geometrischen Optimierung systembestimmender Parameter.
- Zu den Untersuchungen im Makroskalenbereich gehören:
- Numerische Analysen des Tragverhaltens komplexer hybrider Tragstrukturen zur Validierung analytischer Ingenieurmodelle,
 - Experimentelle Analysen an Klein- und Referenzbauteilen im Realmaßstab zur Validierung der numerischen Modelle unter komplexen Beanspruchungssituationen.
- 15) Die Erarbeitung robuster Herstellungstechnologien zur Fertigung der hybriden Tragsysteme stellt eine wesentliche Grundlage für deren industrielle Anwendung dar. Es wurden speziell angepasste Fertigungsverfahren entwickelt, die eine effiziente Herstellung in gleichbleibend hoher Qualität gewährleisten.

- 16) Eine experimentelle, numerische und analytische Ermittlung wesentlicher mechanischer, thermischer und elektrischer Systemeigenschaften stellt die Grundlage der bautechnisch erforderlichen und wahrscheinlichkeitstheoretisch abgesicherten Bemessung dar.

Ergebnisse

- 17) Die durchgeführten Forschungsarbeiten führten zur Entwicklung von:
- Hybriden, zugbeanspruchbaren Klebstoff-Faser-Verbundwerkstoffen (KFV),
 - Hochtragfähigen und -steifen Alu-CFK-Hybridelementen,
 - Transparenten und hochtragfähigen Glas-Kunststoff-Hybridelementen.
- 18) Die entwickelten Hybridsysteme stellen hochleistungsfähige, für spezielle Anwendungen optimierte Tragsysteme dar, mit denen herkömmliche Systeme oder Fertigungsverfahren signifikant verbessert werden können.
- 19) Klebstoff-Faser-Verbundwerkstoffe erweitern das Anwendungsspektrum von Klebstoffen vom reinen Verbindungsmittel zu strukturell tragfähigen Hybridwerkstoffen, die Beanspruchungen aus Schub, Druck und Zug definiert aufnehmen und übertragen können. Insbesondere steigern die Fasern die i.Allg. geringe Zugfestigkeit des Klebstoffs. Zusätzlich bieten Füllstoffe eine Möglichkeit, die Steifigkeit des Klebstoffs zu steigern.
- 20) Der Einsatz einer robusten und derzeit in ihrer Entwicklung befindlichen Herstellungstechnologie zum Einbringen und Homogenisieren hoher Faservolumenanteile in den Klebstoff ermöglicht eine Optimierung der mechanischen Eigenschaften des KFV.
- 21) Die neue Qualität von Alu-CFK-Hybridelementen wird durch eine dauerhaft gestaltete Klebverbindung zwischen Aluminium und CFK erreicht. Durch die Anordnung von CFK-Lamellen in den am stärksten längskraftbeanspruchten Querschnittsbereichen des Hybridelementes gelingt es, neben einer Verkleinerung der Querschnitte Gewichtsreduzierungen von ca. 30 % zu realisieren. Wird die Nutzungsdauer von Alu-CFK-Hybridelementen ganzheitlich betrachtet, so können Kosteneinsparungen erzielt werden.
- 22) CFK-Lamellen können in ihrer Druckfestigkeit durch eine homogene Anordnung der Kohlefasern, die während der Aushärtung in der Kunststoffmatrix vorzuspannen sind, gesteigert werden.
- 23) Glas-Kunststoff-Hybridelemente ermöglichen die Konstruktion transparenter Tragstrukturen in einer neuen optischen Qualität. Die Tragstruktur eines Glas-Kunststoff-Hybridelementes ist so ausgelegt, dass sie ein redundantes Tragverhalten aufweist. Für den Fall eines Glasbruches gewährleisten die Sicherheitselemente aus Kunststoff eine definierte Resttragfähigkeit.
- 24) Die in Simulation und Experiment ermittelten Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitseigenschaften der entwickelten hybriden Tragsysteme sind signifikant verbessert verglichen mit den gegenwärtig eingesetzten Systemen. Entsprechend der Sicherheitsphilosophie im Bauwesen sind die Langzeiteigenschaften hybrider Strukturen mittels experimenteller Untersuchungen unter verschiedenartigen Einflüssen, wie z. B. Temperatur, UV-Strahlung, Feuchtigkeit und dynamischen Beanspruchungen, zu quantifizieren. Daraus können die bisher über aufwändige Kurzzeitversuche ermittelten Eigenschaften über Experimente abgesichert werden.
- 25) Das Entwickeln hybrider Tragstrukturen stellt eine zentrale Aufgabe weiterer ingenieurtechnischer Forschungstätigkeit dar. Für die methodische Herangehensweise sind numerische und experimentelle Untersuchungsmethoden weiterzuentwickeln.
- 26) Insbesondere Multiskalenmodelle ermöglichen eine sehr komplexe Betrachtung zukunftsweisender hybrider Elemente und daraus gebildeter Tragstrukturen.

Eigene Veröffentlichungen

Seres, N., Dunai, L., Göbel M.

Investigation on the Effect of 3D Cold Forming; Experimental and Numerical Analyses.

In: EUROSTEEL 2011, August 31 - September 2, 2011, Budapest, Hungary, S. 147-152, ISBN: 978-92-9147-103-4.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F., Müller, H., Schmidt, Th., Bliedtner, J.:

Schweißen von Glas mittels Laserstrahl - Potenzial für neue Anwendungsgebiete.

In: Tagungsband, Thüringer Werkstofftag 2010, 24. März 2010, Ilmenau, S. 203 - 208.

Hildebrand, J., Göbel, M., Wittor, B., Werner, F.:

Schweißen und Schneiden von Glas mittels Laserstrahl – Potenzial der numerischen Simulation.

In: Tagungsband: SYSWELD Forum 2009, 22.-23. Oktober 2009, Weimar, S. 115-129.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Glas-Kunststoff-Hybridelemente – Einsatz und Werkstoffeigenschaften.

In: 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 01. – 03. April 2009, Bayreuth, S. 578-584, ISBN: 978-3-527-32615-0.

Werner, F., Göbel, M., Hildebrand, J.:

Numerische Analyse geschweißter Verbindungen von Duplexstahl und Quarzglas.

In: Stahlbau 78 (2009) 3, S. 180-187, ISSN 0038-9145.

Göbel, M., Werner, F.:

Faserverstärkte Klebstoffe – Betrachtung der Verbundtragwirkung.

In: 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 01. – 03. April 2009, Bayreuth, ISBN: 978-3-527-32615-0.

Göbel, M.; Werner, F.:

Laserstrahlschweißen von Quarzglas / Simulationsmöglichkeiten.

In: Zukunft Glas, Von der Tradition zum High-Tech-Produkt, S. 153-162, OTTI Symposium 04.-05. Juni 2008 Zwiesel.

Göbel, M.; Hildebrand; J.:

Schweißen von Quarzglas – Numerische und experimentelle Untersuchungen.

VDM Verlag 2008; ISBN: 978-3-8364-8158-8.

Göbel, M.; Werner, F.:

Experimentelle und numerische Untersuchung einer Fensterrahmenecke.

In: Workshop "Computergestützte Simulation", 25. Juli 2007, Weimar.

Göbel, M.; Hildebrand, J.; Werner, F.:

Advantages of FE-Simulation for the Development of a Welding Procedure for Quartz Glass.

In: GLASS PERFORMANCE DAYS 2007, 15-18. June 2007, Tampere, Finland S. 733-737, ISBN: 952-91-8674-6.

Göbel, M.; Hildebrand, J.; Werner, F.:

Glass-Plastic-Hybrid Construction.

In: GLASS PERFORMANCE DAYS 2007, 15-18. June 2007, Tampere, Finnland S. 355-358, ISBN: 952-91-8674-6.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Numerisches Modell für die Simulation einer Laserstrahlschweißung von Quarzglas.

IKM Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen 2006, ISSN 1661-4085 2006.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

The Simulation of Laser Beam Welding of Silica Elements.

In: Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, June 14–16, 2006, Montreal, Canada, S. 2025-2034, ISBN: 2-921145-58-8.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Numerisches Modell für die Simulation einer Laserstrahlschweißung von Quarzglas.

In: IKM Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen 2006, 12.–14. Juli 2006, Weimar, ISSN 1661-4085.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Laser Beam Welding on Quartz Glass Elements.

In: Numerical Analysis of Weldability, 25. – 27. September 2006 Graz – Seggau.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Die Anwendung des Laserstrahlschweißens als Fügetechnik für Bauteile aus Quarzglas.

In: DVS Berichte 2006, Lasertechnik – neue Entwicklungen und Anwendungen
ISBN: 3-87155-797-8; S 255-265.

Göbel, M., Hildebrand, J.:

Laserstrahlschweißen von Rohren aus Quarzglas.

In: 16. DAST Kolloquium Stahlbau S: 29-30, Stahlbau Verlags und Service GmbH, Düsseldorf, 2006, ISBN: 13 978-3-923726-80-6.

Müller, H., Schmidt, Th., Wächter, S., Bliedtner, J., Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Glasschweißen - Möglichkeiten durch den Einsatz von Laserstrahlen.

Glass welding - possibilities by using laser beams.

In: Konferenz-Einzelbericht: DVS-Berichte Band 240 (2006) S. 126-130.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F., Müller, H., Schmidt, Th., Wächter, S., Bliedtner, J.

Die Anwendung des Laserstrahlschweißens als Fügetechnik für Bauteile aus Quarzglas.

In: Konferenz-Einzelbericht: Lasertechnik – neue Entwicklung und Anwendungen, DVS-Berichte Band 241 (2006) S. 255-265.

Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.:

Simulation einer Laserstrahlschweißung an einem Quarzglasstück.

In: Tagungsband: SYSWELD Forum 2005, 1. September 2005, Weimar, S. 67-76, ISBN: 3-86068-266-0.

A. ANHANG DER DISSERTATION „FASER-KUNSTSTOFF-METALL-GLAS-HYBRIDSYSTEME“	I
A.1 MODELLBILDUNG UND RHEOLOGISCHE GRUNDLAGEN	I
A.1.1 RHEOLOGISCHE GRUNDELEMENTE	I
A.1.2 MECHANISCHE GRUNDEIGENSCHAFTEN	III
A.1.3 MECHANISCHE FORMULIERUNG VON BETONWERKSTOFFEN	XIV
A.1.4 ABBILDUNG RÄUMLICH STOCHASTISCH VERTEILTER FASER-MATRIX-SYSTEME	XIV
A.1.5 ABBILDUNG VON ADHÄSIONSSCHICHTVERSAGEN	XIV
A.1.6 NOMINALSPANNUNG UND WAHRE SPANNUNGEN	XVII
A.2 ANFORDERUNGEN AN BEMESSUNGSKONZEPTE	XVIII
A.2.1 SICHERHEITSBETRACHTUNGEN	XIX
A.2.2 EINWIRKUNGEN UND WIDERSTÄNDE	XXI
A.2.3 DETERMINISTISCHE BEMESSUNG	XXIII
A.2.4 PROBABILISTISCHE BEMESSUNG	XXIII
A.2.5 KORRELATION AUS WINDEINWIRKUNG UND TEMPERATUR	XXIII
A.3 VERBINDUNGSTECHNOLOGIEN DES STAHLBAUS	XXIV
A.3.1 SCHRAUB- UND BOLZENVERBINDUNGEN	XXIV
A.3.2 SCHWEIßVERBINDUNGEN	XXV
A.4 KLEBVERBINDUNGEN	XXV
A.4.1 PHYSIKALISCH ABBINDENDE KLEBSTOFFE	XXV
A.4.2 CHEMISCH HÄRTENDE KLEBSTOFFE	XXVI
A.4.3 KLEBSTOFFGERECHTES KONSTRUIEREN IN BEISPIELEN	XXIX
A.4.4 MÖGLICHKEITEN DER OBERFLÄCHENVORBEHANDLUNG	XXXI
A.5 CHARAKTERISIERUNG UNTERSCHIEDLICHER FASERWERKSTOFFE	XXXIV
A.5.1 KOHLENSTOFFFASERN	XXXIV
A.5.2 GLASFASERN	XXXVI
A.5.3 METALLFASERN	XXXVII
A.5.4 NATURFASERN	XXXVIII
A.5.5 POLYMERE KUNSTFASERN	XL
A.6 EIGENSCHAFTEN KUNSTSTOFFGEBUNDENER FASER-MATRIX-SYSTEME	XL
A.6.1 SPRITZGUSSSYSTEME	XL
A.6.2 LAMINIERSYSTEME / EXTRUDIERSYSTEME	XLIV
A.6.3 GLASFASERVERSTÄRKTER KUNSTSTOFF (GFK)	XLIV
A.6.4 KOHLENSTOFFFASER-VERSTÄRKTER KUNSTSTOFF (CFK)	XLV
A.7 SPEZIELLE BETRACHTUNGEN ZUR ANWENDUNG VON KfV IM FASSADENBAU	XLVI
A.7.1 AUSBILDUNG HERKÖMMLICHER SYSTEME	XLVII
A.7.2 EINFACHE VERBINDUNGSFORMEN	XLVIII
A.7.3 KOMPLEXE VERBINDUNGSFORMEN	LII
A.7.4 VERGLEICHSBETRACHTUNG AN VERSCHIEDENEN FASSADENELEMENTEN	LVII
A.7.5 APPLIKATION UND HERSTELLUNG VON KfV-GEFÜGTEN FASSADENELEMENTEN	LXII
A.8 KfV ALS ZUGBEWEHRUNG VON BETON	LXII
A.8.1 BEANSPRUCHUNGSSITUATION / TRAGSYSTEM	LXII
A.8.2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	LXIII
A.8.3 NUMERISCHE ANALYSE DES 4-PUNKT-BIEGEVERSUCHES	LXVIII
A.8.4 VERBESSERUNG VON ADHÄSIONS- UND KOHÄSIONSEIGENSCHAFTEN	LXX
A.8.5 UNTERSCHIEDE ZWISCHEN STABSTAHL- UND KfV-BEWEHRUNG	LXXI
A.9 SPEZIELLE BETRACHTUNGEN AN ALU-CFK-HYBRIDELEMENTEN	LXXII

<u>A.9.1</u>	<u>WERKSTOFFAUSWAHL FÜR DIE HERSTELLUNG VON ALU-CFK-HYBRIDELEMENTEN</u>	LXXII
<u>A.9.2</u>	<u>ZWEISCHNITTIGE SCHUBVERSUCHE</u>	LXXII
<u>A.9.3</u>	<u>CFK-LAMELLEN-AUSZUGVERSUCHE</u>	LXXVI
<u>A.9.4</u>	<u>AUSZUGVERSUCHE NACH TEMPERATURWECHSELBEANSPRUCHUNG</u>	LXXVI
<u>A.9.5</u>	<u>EINFELDTRÄGER UNTER KURZZEITEINWIRKUNG</u>	LXXVIII
<u>A.9.6</u>	<u>DAUERHAFTIGKEITSUNTERSUCHUNGEN AN ALU-CFK-HYBRIDELEMENTEN</u>	XC
<u>A.9.7</u>	<u>HERSTELLUNGSVERFAHREN UND ÜBERWACHUNGSMÖGLICHKEITEN</u>	XCIV
<u>A.9.8</u>	<u>ELASTISCHE UND PLASTISCHE QUERSCHNITTSKENNWERTE</u>	XCVI
<u>A.9.9</u>	<u>TRAGFÄHIGKEITSBETRACHTUNG MITTELS MONTE-CARLO-SIMULATION</u>	CI
<u>A.9.10</u>	<u>ALU-CFK-HYBRIDELEMENTE ALS TRAGSTRUKTUREN FLIEGENDER BAUTEN</u>	CVIII
<u>A.10</u>	<u>CFK-VERSTÄRKTE STAHELEMENTE</u>	CIX
<u>A.10.1</u>	<u>AUSGANGSWERKSTOFFE</u>	CX
<u>A.10.2</u>	<u>MECHANISCHES SYSTEM</u>	CXI
<u>A.10.3</u>	<u>ANWENDUNG</u>	CXI
<u>A.11</u>	<u>CFK-VERSTÄRKTE BETONTRAGWERKE</u>	CXII
<u>A.11.1</u>	<u>MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN</u>	CXII
<u>A.11.2</u>	<u>OBERFLÄCHENEIGENSCHAFTEN</u>	CXIII
<u>A.11.3</u>	<u>VERBUNDSYSTEM</u>	CXIII
<u>A.11.4</u>	<u>WEITERE ENTWICKLUNG</u>	CXV
<u>A.12</u>	<u>ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNISSE</u>	CXVI

A. Anhang der Dissertation „FASER-KUNSTSTOFF-METALL-GLAS-HYBRIDSYSTEME“

A.1 Modellbildung und rheologische Grundlagen

A.1.1 Rheologische Grundelemente

Prinzipiell können zur Beschreibung eines Materialverhaltens einfache mechanische Elemente herangezogen werden. Das Hookesche Element der Feder zur Abbildung des linear elastischen Verhaltens und das Newtonsche Element des Dämpfers zur Beschreibung viskoser Materialeigenschaften stellen die zwei wichtigsten rheologischen Grundelemente dar. Allein aus einer Kombination dieser beiden Elemente lassen sich Materialmodelle konstruieren, die für die Beschreibung einer Vielzahl unterschiedlicher Werkstoffstrukturen geeignet sind. Die zu diesen Grundelementen korrespondierenden Werkstoffkennwerte sind E-Modul bzw. Viskosität. Zur Abbildung plastischer Effekte wird der St-Venant-Körper verwendet. Nachfolgend werden die mathematischen Formulierungen ausgewählter rheologischer Grundelemente anhand einfacher Spannungs-Dehnungs-Zeit-Beschreibungen diskutiert (Lüders, et al., 2009; Nasdala, 2010).

HOOKESCHER Festkörper

Unter dem HOOKESCHEN Festkörper versteht man i. Allg. einen ideal elastisch zu beschreibenden Stoff, bei dem die gesamte Deformation sofort beim Aufbringen einer Kraft eintritt. Dabei besteht eine Proportionalität zwischen Kraft und Verformung. Entlastet man den Körper, so gehen die Spannungen und Verformungen auf ihre Ausgangswerte zurück. Diese genannten Eigenschaften zeigt eine ideale Feder, die daher oft als Ersatzmodell für den HOOKESCHEN Körper herangezogen wird. Die prinzipielle Ausbildung eines HOOKESCHEN Elementes ist in Abbildung A.1 dargestellt.

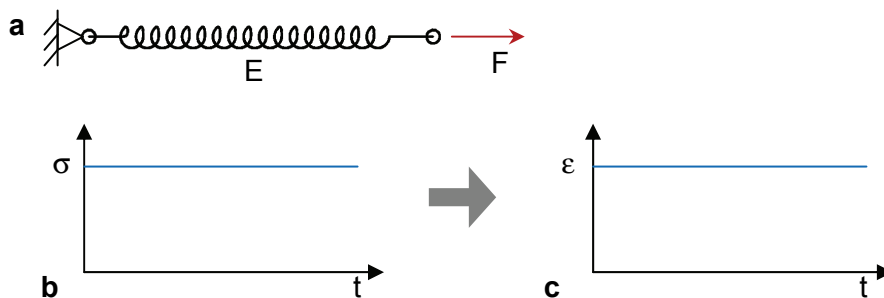


Abbildung A.1: Definition eines Hookeschen Festkörpers; a: mechanisches Modell; b: Spannungs-Zeit-Verlauf; c: Dehnungs-Zeit-Verlauf

Für die ideale Feder gilt:

$$\sigma = E \times \epsilon. \quad (\text{A.1})$$

NEWTONSCHER Körper

Kommt es bei einem Körper zu einer Proportionalität zwischen der wirkenden Spannung und der sich einstellenden Deformationsgeschwindigkeit, so bezeichnet man diesen als NEWTONSCHEN Körper. Tritt die Belastung stufenförmig auf, so ändert sich die Deformation linear mit der Belastungszeit. Kommt es anschließend zur Entlastung, so bleibt die erreichte

Scherung erhalten, was auch als ideal viskoses Verhalten bezeichnet wird. Als Modell für die genannten Eigenschaften eignet sich ein Dämpfer, der aus einem mit Öl gefüllten Rohrstück besteht und in dem sich ein eingepasster Kolben bewegt. Der Dämpfer dient als Ersatzsystem für den NEWTONSCHEN Körper. Die prinzipielle Ausbildung eines NEWTONSCHEN Elementes ist in Abbildung A.2 dargestellt.

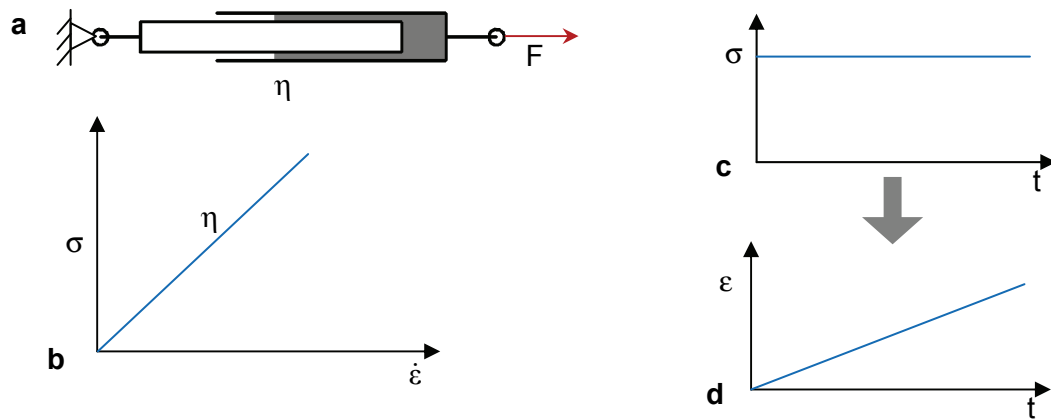


Abbildung A.2: Mechanisches Modell eines Newtonschen Körpers; a: mechanische Modell; b: Spannungs-Dehnratenverlauf; c: Spannungs-Zeitverlauf; d: zum Spannungs-Zeitverlauf zugehöriger Dehnungsverlauf

Für den idealen NEWTONSCHEN Körper gilt:

$$\sigma = \eta \times \dot{\epsilon} . \quad (\text{A.2})$$

ST-VENANT Körper

Hierunter versteht man einen ideal plastischen Stoff, der sich beim Anlegen einer Beanspruchung wie ein starrer Körper verhält, solange die Beanspruchung unterhalb eines Schwellwertes bleibt. Wird die als Fließgrenze bezeichnete Schwellspannung σ_v erreicht, tritt viskoses Fließen mit einer nicht definierten Deformationsgeschwindigkeit auf. Symbolisch für dieses Verhalten kann man einen starren Körper unter dem Einfluss von Reibungskräften betrachten, der parallel zu seiner ebenen Unterlage gezogen wird. Vernachlässigt man die Trägheitskräfte, so verharrt der Körper in Ruhe, solange die aufgebrachte Kraft kleiner ist als die Haftreibung. Greift jedoch eine Kraft an, die die Haftreibung übertrifft, so kann der Körper bewegt werden. Die charakteristische Kenngröße des Ersatzschaltbildes für diesen Körper ist die plastische Grenzspannung σ_v . Für $\sigma < \sigma_v$ bleibt das Element starr. Erhöht sich die Spannung auf $\sigma = \sigma_v$, so stellt sich ein mechanisch labiler Zustand ein, unabhängig von der Gesamtspannung und der Dehnungsgeschwindigkeit. Damit kann der ST-VENANT Körper keine Spannungen von $\sigma > \sigma_v$ übertragen. Das Verhalten ist extrem nichtlinear und gilt spiegelbildlich für negative Spannungen. Für den ST-VENANT Körper gilt folgende Bedingung:

$$\epsilon = \begin{cases} 0 & \text{für } \sigma < \sigma_v \\ \epsilon(t) & \text{für } \sigma \geq \sigma_v \end{cases} . \quad (\text{A.3})$$

Die prinzipielle Ausbildung eines ST-VENANT Körpers ist in Abbildung A.3 dargestellt.

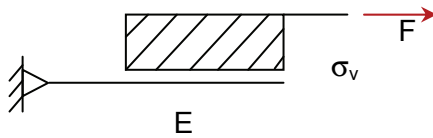


Abbildung A.3: Definition eines St-Venant Körpers

A.1.2 Mechanische Grundeigenschaften

Linearelastisch-isotrope Materialformulierung

Bei der mechanischen Betrachtung von elastischen Werkstoffen spielen die mechanischen Kenngrößen Elastizitätsmodul, Querdehnzahl, Schubmodul und Kompressionsmodul eine wesentliche Rolle. Bei der linearelastisch-isotropen Materialdefinition ist der Elastizitätsmodul in Belastungs- und Entlastungsrichtung äquivalent definiert, sodass der Belastungsverlauf keinen Einfluss auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehung hat. Abbildung A.4 zeigt die Spannungs-Dehnungsbeziehung einer linear-elastischen Materialformulierung (Eindhoven University of Technology, 2005; Reinhardt, 2012).

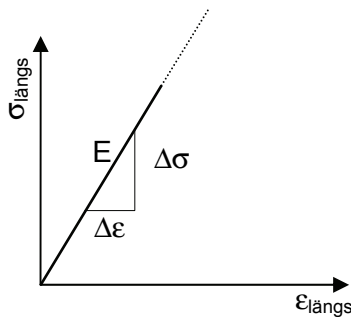


Abbildung A.4: Linearelastisch-isotrope Spannungs-Dehnungsbeziehung

Betrachtet man einen Einheitswürfel mit der Kantenlänge 1 und Normalspannungen σ_x , σ_y , und σ_z , so führen diese Normalspannungen zu einer Volumenänderung des Würfels.

$$V = (1 + \varepsilon_x) + (1 + \varepsilon_y) + (1 + \varepsilon_z). \quad (\text{A.4})$$

Ausformuliert bedeutet dies:

$$V = 1 + \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z + \varepsilon_x \times \varepsilon_y + \varepsilon_x \times \varepsilon_z + \varepsilon_y \times \varepsilon_z + \varepsilon_x \times \varepsilon_y \times \varepsilon_z. \quad (\text{A.5})$$

Bei kleinen Dehnungen ε_x , ε_y und ε_z können die Produkte der einzelnen Dehnungen vernachlässigt werden. Damit gilt:

$$V = 1 + \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z. \quad (\text{A.6})$$

Die Volumenänderung ΔV entspricht somit:

$$\Delta V = V - 1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z. \quad (\text{A.7})$$

Substituiert man die Dehnung durch eine Beziehung aus Spannung und Längssteifigkeit und unterstellt ein isotropes Materialverhalten ($\mu = \mu_{xy} = \mu_{xz} = \mu_{yz}$), so kann man schreiben:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\mu \times \sigma_y}{E} - \frac{\mu \times \sigma_z}{E}; \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\mu \times \sigma_x}{E} - \frac{\mu \times \sigma_z}{E}; \quad \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\mu \times \sigma_x}{E} - \frac{\mu \times \sigma_y}{E}$$

Die Volumenänderung ΔV entspricht somit:

$$\Delta V = - \frac{(-1+2\mu)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)}{E}. \quad (\text{A.8})$$

Für den Spezialfall eines gleichmäßigen hydrostatischen Druckes gilt:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z; \quad \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = p \quad (\text{A.9})$$

$$\Delta V = - \frac{(-1+2\mu)(3p)}{E}. \quad (\text{A.10})$$

Durch Einführung des Kompressionsmoduls K:

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}, \quad (\text{A.11})$$

lässt sich der Ausdruck vereinfachen zu:

$$\Delta V = - \frac{p}{K}. \quad (\text{A.12})$$

Der Kompressionsmodul ist abhängig von E-Modul und Querdehnzahl. Für die meisten Materialien gilt, dass eine Kompression zu einer Zunahme der Materialdichte führt. Der Kompressionsmodul ist damit positiv und somit muss auch der Ausdruck:

$$(1-2\mu) \text{ positiv sein.} \quad (\text{A.13})$$

Die Querdehnzahl liegt somit in einem Wertebereich von:

$$0 < \mu < 0,5.$$

Die Schubspannung τ wird als Quotient aus einer zur Querschnittsfläche A parallelen Kraft F und der Querschnittsfläche A des Körpers eingeführt.

Der Schubmodul beschreibt das Verhältnis aus Schubspannung τ und Tangens des Schubwinkels γ

$$\tau = G \times \tan(\gamma). \quad (\text{A.14})$$

Der Schubmodul steht bei isotrop elastischen Materialien mit dem Elastizitätsmodul, der Querdehnzahl und dem Schubmodul in folgender Beziehung:

$$G = E \times \frac{1}{2(1+\mu)} = \frac{3K \times E}{9K - E} = 3K \frac{1-2\mu}{2+2\mu}. \quad (\text{A.15})$$

Bei einem Wertebereich der Querdehnzahl $0 < \mu < 0,5$ ergibt sich somit:

$$\frac{1}{3}E \leq G \leq \frac{1}{2}E, \quad (\text{A.16})$$

$$E_x = E_y = E_z,$$

$$\mu_{xy} = \mu_{xz} = \mu_{yz}.$$

Eine linear-elastisch-isotrope Materialdefinition stellt numerisch die einfachste Art des Materialmodells dar. Sie kann für unterschiedliche Materialien, wie z. B. Stahl, Aluminium, Glas oder ungerissenen Beton, eingesetzt werden, mit der Beschränkung, dass die Dehnungen im Material gering bleiben und nichtlineare Effekte im Werkstoff vernachlässigt werden können.

Anisotropie / Orthotropie

Einaxiale Faser-Matrix-Systeme weisen i. Allg. ein orthotropes Materialverhalten auf, was eine Sonderform der Anisotropie darstellt. Ein orthotropes Materialverhalten ist gekennzeich-

net durch richtungsabhängige Elastizitätseigenschaften, wobei es jedoch keine Kopplung zwischen Längsdehnungen und Schubverzerrungen gibt. Schubspannungen erzeugen somit keine Längsdehnungen. Orthotrope Materialeigenschaften können unter anderem bei Holzwerkstoffen und einaxialen Faser-Matrix-Systemen beobachtet werden. Die mathematische Formulierung eines orthotropen Werkstoffs lautet (Altenbach, et al., 1996):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\mu_{xy}}{E_x} & -\frac{\mu_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{xy}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\mu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{xz}}{E_z} & -\frac{\mu_{yz}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}. \quad (\text{A.17})$$

Für ein reales orthotropes Material muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$1 - \frac{\mu_{xy}^2 \times E_y}{E_x} - \frac{\mu_{yz}^2 \times E_z}{E_y} - \frac{\mu_{xz}^2 \times E_x}{E_z} - 2 \frac{\mu_{xy} \times \mu_{yz} \times \mu_{xz} \times E_z}{E_x} > 0. \quad (\text{A.18})$$

Bei orthotropen Materialgesetzen kann der Schubmodul nicht aus den Elastizitätsmodulen und den Querdehnzahlen ermittelt werden. Der Schubmodul ist vielmehr eine unabhängige Größe und für das Material entsprechend experimentell zu ermitteln (Dunky, et al., 2002).

Bilineare / multilinear isotrope mechanische Abbildung

Eine bilineare bzw. multilineare Materialmodellierung gestattet die Abbildung von nichtlinearen Effekten, die bei vielen Materialien in Beanspruchungsbereichen oberhalb der Dehngrenze bzw. Plastizitätsgrenze auftreten. Die numerische Formulierung erfolgt über die Definition einer dehnungsabhängigen Materialsteifigkeit. Bei den in Abbildung A.5 dargestellten bilinearen Formulierungen handelt es sich um eine zwei-multilineare Materialabbildungen. In einem bilinear isotropen Materialgesetz werden zwei unterschiedliche Steifigkeitsmoduli definiert. Der Elastizitätsmodul wird in Zusammenhang mit einer Streckgrenze definiert. Der Geltungsbereich des Elastizitätsmoduls bezieht sich bei der ersten Belastung auf den Betrag der Streckgrenze. Bei Überschreitung der Streckgrenze wird der Elastizitätsmodul durch einen Tangentenmodul ersetzt und die Spannungs-Dehnungs-Beziehung durch Superpositionierung der Dehnungen mit den jeweils gültigen Moduli ermittelt. Nach vollständiger Entlastung fällt die Spannung auf $\sigma = 0$ ab, die bleibende Dehnung ist von dem erreichten maximalen Dehnungswert abhängig. Für den Fall, dass die erreichte Maximalspannung unterhalb der Streckgrenze liegt, ist die Materialreaktion identisch mit der Materialreaktion, die mit einem ideal elastisch isotropen Materialgesetz berechnet wird. Für den Fall einer plastischen Wechselbeanspruchung bildet sich ein Versteifungseffekt aus, bei dem der Betrag der Streckgrenze immer dem Betrag der erreichten Maximalspannung entspricht.

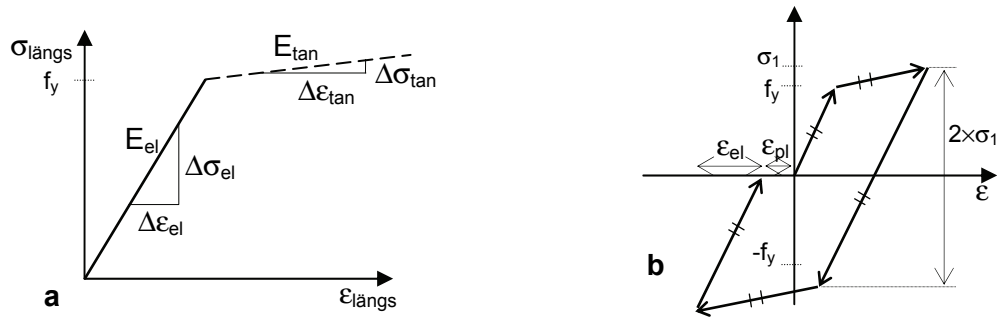


Abbildung A.5: Bilinear isotrope Materialformulierung; a: Darstellung der bilinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung; b: bilinear isotrope Materialreaktion bei Wechselbeanspruchung

Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung für einen Belastungsvorgang bis zu einer Spannung σ_1 oberhalb der Streckgrenze lässt sich beschreiben mit:

$$\varepsilon_{\text{ges}} = \int_0^{f_y} \frac{1}{E_{\text{el}}} d\sigma + \int_{f_y}^{\sigma_1} \frac{1}{E_{\text{tan}}} d\sigma. \quad (\text{A.19})$$

Der elastische Dehnungsanteil ε_{el} und der plastische Anteil ε_{pl} lässt sich beschreiben mit:

$$\varepsilon_{\text{el}} = \int_0^{\sigma_1} \frac{1}{E_{\text{el}}} d\sigma, \quad (\text{A.20})$$

$$\varepsilon_{\text{pl}} = \int_{f_y}^{\sigma_1} \frac{1}{E_{\text{tan}}} d\sigma - \int_{f_y}^{\sigma_1} \frac{1}{E_{\text{el}}} d\sigma. \quad (\text{A.21})$$

Aufgrund dieser Definition ist die elastische Dehnung ε_{el} bei Überschreitung der Streckgrenze f_y abhängig von der Maximalspannung σ_1 .

Eine Weiterentwicklung des bilinear isotropen Materialmodells besteht in der multilinear isotropen Materialdefinition. Dieses Materialmodell erlaubt eine detaillierte Definition des Spannungs-Dehnungsverhaltens über n verschiedene Spannungs-Dehnungs-Beziehungen.

Einschränkungen der multilinear-isotropen Materialdefinition liegen in der Höhe der E-Moduli. Der Anfangs-E-Modul muss in den meisten FEM-Programmen den höchsten Wert von allen folgenden E-Moduli besitzen. Weiterhin sind negative E-Moduli, die zu mechanischen Entfestigungseffekten führen, nicht empfohlen, da diese Entfestigungseffekte bei der Berechnung des energetischen Gleichgewichts zu großen Konvergenzproblemen in der Lösung einer FEM-Rechnung führen (Bathe, 2002).

Bilineare / multilinear kinematische mechanische Abbildung

Das multilinear kinematische Materialmodell ist eine Entwicklung, die auf das multilinear isotrope Materialmodell aufbaut. Der Unterschied zu der isotropen Materialdefinition liegt in einer variablen Fließspannung, die permanent vom jeweiligen aktuellen Spannungszustand abhängig ist. Für ein 2-multilinear kinematisches Materialmodell beträgt das maximal mögliche elastische Spannungsspiel den zweifachen Betrag der Streckgrenze. Damit ist das kinematische Materialmodell stark von der Belastungsgeschichte abhängig. Für numerische Berechnungen bedeutet das einen erhöhten Berechnungsaufwand, da im plastischen Bereich die Streckgrenze in jedem Rechenschritt neu bestimmt werden muss. Die Berechnung von plastischen Wechselbeanspruchungen mit einem kinematischen Materialmodell stellt hohe Anforderungen an die Qualität der Vernetzung, da speziell in Unstetigkeitsbereichen

große Dehnungsunterschiede auftreten können. Abbildung A.6 zeigt das Spannungs-Dehnungsverhalten von multilinear kinematischen Materialmodellen unter plastischer Wechselbeanspruchung (Bathe, 2002).

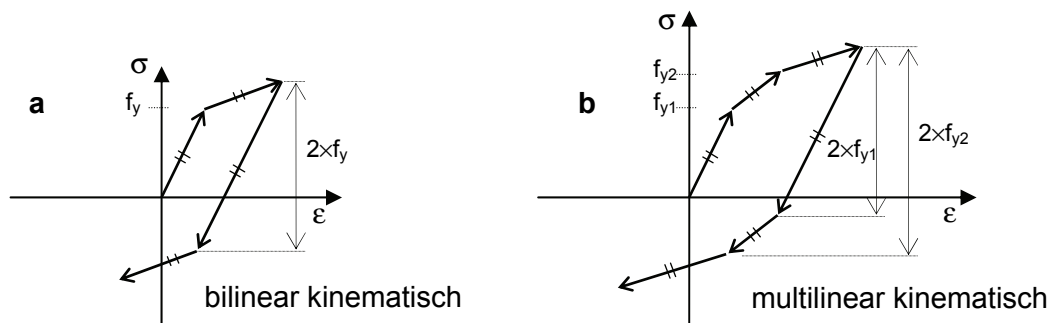


Abbildung A.6: Multilinear kinematische Materialformulierung; a: Darstellung der bilinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung; b: multilinear kinematische Materialreaktion bei Wechselbeanspruchung

Zeitabhängige Materialmodelle

Die Anwendung zeitabhängiger Materialmodelle ist vor allem bei der Materialmodellierung von Kunststoffen von besonderer Bedeutung. Als Erweiterung zu den statischen Materialmodellen wird hier zusätzlich ein viskoses Grundelement in das Materialmodell eingebaut, das eine Spannungsrelaxation bei fortschreitender Belastungsdauer hervorruft.

Viskoelastische Stoffe weisen ein zeitabhängiges Materialverhalten auf. Dies zeigt sich z. B. während eines Zugversuchs. Das Material zeigt einerseits elastische Eigenschaften auf, unter einer konstant gehaltenen Belastung treten aber auch zeitabhängige Kriechverformungen auf. Die Verformungsgeschwindigkeit kann mittels der dynamischen Viskosität η eines Materials beschrieben werden (Nasdala, 2010).

Viskoelastisches Materialverhalten zeichnet sich durch anelastisches Verhalten aus. Das Verhältnis von Spannung zu Dehnung ist nicht mehr linear mit dem E-Modul beschreibbar. Der Einfluss der Viskosität wächst i. Allg. mit steigender Temperatur stark an. Die in Abbildung A.7 dargestellte Kriechkurve eines viskoelastischen Stoffes verdeutlicht dies.

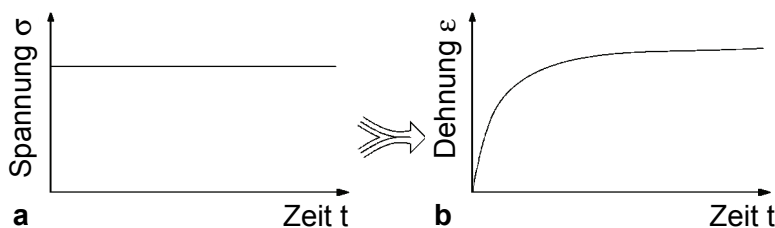


Abbildung A.7: Kriechen von Glas im Temperaturbereich oberhalb des Glasübergangspunktes T_g ; a: Einwirkung einer konstanten Spannung; b: zeitabhängige Dehnung

Das Kriechverhalten eines viskos-elastischen Materials unter einer konstanten Spannung lässt sich mit der Kriechnachgiebigkeit beschreiben. Es gilt:

$$D(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma_0}. \quad (\text{A.22})$$

Alternativ zur Kriechkurve kann man wie in Abbildung A.8 dargestellt, unter Beibehaltung einer konstanten Dehnung eine Spannungsrelaxation feststellen.

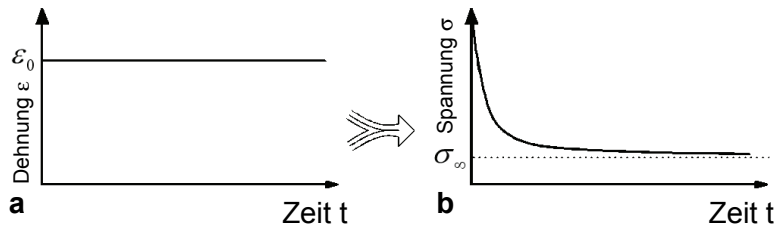


Abbildung A.8: Abbau von Spannungen unter Einwirkung einer konstanten Dehnung
a: Einwirkung einer zeitinvarianten Dehnung; b: zeitabhängige Spannung

Damit lässt sich ein zeitabhängiger E-Modul wie folgt beschreiben:

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0}. \quad (\text{A.23})$$

Aus Kriechkurve und Relaxationsverhalten eines Stoffes folgt (Eindhoven University of Technology, 2005):

$$\varepsilon(t) = \Delta\sigma \times D(t-t_0), \quad (\text{A.24})$$

mit $(t \geq t_0)$.

Die Kriechnachgiebigkeit ist also unabhängig von der eingetragenen Spannung (Eindhoven University of Technology, 2005) und damit wie in Abbildung A.9 dargestellt superponierbar.

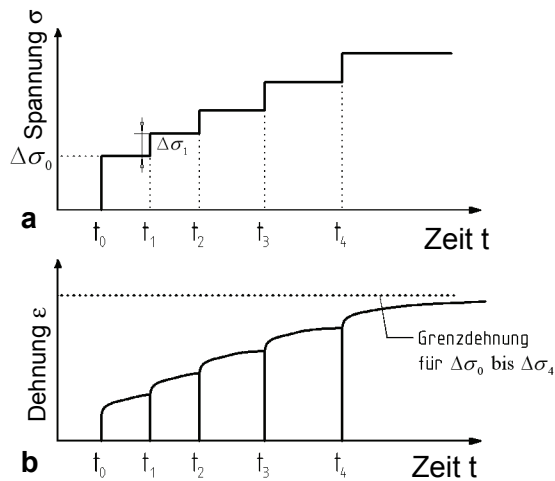


Abbildung A.9: Superposition von Spannungsänderungen (Eindhoven University of Technology, 2005); a: Einwirkung von Spannungskomponenten; b: resultierende Dehnungen

Die Kriechnachgiebigkeit D in Abhängigkeit der Zeit t wird auch als Kriechfunktion $D(t)$ bezeichnet. Die Integration unendlich vieler Spannungsänderungen über die Zeit führt zum BOLTZMANN INTEGRAL (Göbel, et al., 2008):

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \Delta\sigma_0 \times D(t-t_0) + \Delta\sigma_1 \times D(t-t_1) + \Delta\sigma_2 \times D(t-t_2) + \Delta\sigma_3 \times D(t-t_3) + \dots \\ &= \sum_{i=0}^n \Delta\sigma_i \times D(t-t_i) \quad \rightarrow \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \rightarrow (t_n \rightarrow \tau). \end{aligned} \quad (\text{A.25})$$

Die Integration über die Zeit ergibt:

$$\varepsilon(t) = \int_{\tau=t_0}^t D(t-\tau) \times \dot{\sigma}(\tau) d\tau. \quad (\text{A.26})$$

Die zeitabhängige Spannung berechnet sich dazu analog wie folgt:

$$\sigma(t) = \int_{\tau=t_0}^t E(t-\tau) \times \dot{\varepsilon}(\tau) d\tau. \quad (\text{A.27})$$

Voraussetzung für die Anwendung des BOLTZMANN INTEGRALS ist das Vorhandensein geringer Dehnungen sowie ein temperaturunabhängiges Materialverhalten, damit das Superpositionsprinzip uneingeschränkt Geltung besitzt. Temperaturunabhängiges Materialverhalten kann für Prozesse mit geringen Temperaturänderungen angenommen werden, bei größeren Temperaturwechseln sinkt zwangsläufig die Genauigkeit der Berechnungen.

Der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei einer Einstufenbeanspruchung und viskoelastischem Materialverhalten ist in Abbildung A.10 dargestellt. Viskoelastisches Materialverhalten kennzeichnet sich dabei durch die vollständige Rückbildung der Dehnung nach dem Aussetzen der Belastung.

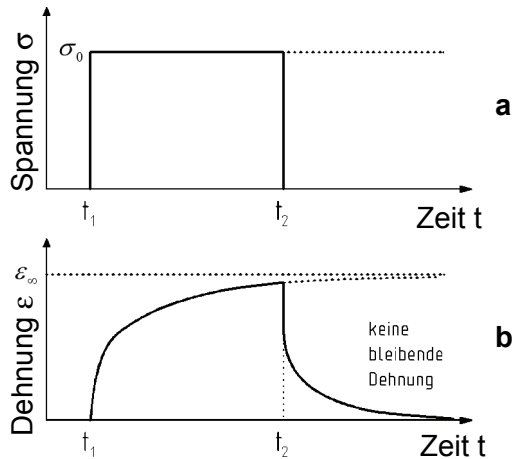


Abbildung A.10: Ideal viskoelastisches Verhalten eines Festkörpers mit vollständigem Dehnungsabbau; a: zeitabhängige Spannungseinwirkung; b: resultierende Dehnung

Die Kriechfunktion $D(t)$ gibt bei einer eingetragenen Belastung zum Zeitpunkt $t = 0$ die verzögerte Einstellung der Dehnung an. Dabei gilt:

$$\dot{D}(t) \geq 0 \quad \text{für } t \geq 0, \quad (\text{A.28})$$

$$\ddot{D}(t) \leq 0 \quad \text{für } t \geq 0. \quad (\text{A.29})$$

Die Dehnung wächst also mit fortlaufender Zeit immer weiter an, der Anstieg der Dehnung nimmt dabei jedoch immer weiter ab.

Für eine konstante Spannung und $\lim_{t \rightarrow \infty}$ bildet sich damit eine Grenzdehnung ε_∞ aus.

Im Umkehrschluss bedeutet dies für den zeitabhängigen E-Modul $E(t)$:

$$\dot{E}(t) \leq 0 \quad \text{für } t \geq 0, \quad (\text{A.30})$$

$$\ddot{E}(t) > 0 \quad \text{für } t \geq 0. \quad (\text{A.31})$$

Der E-Modul sinkt also mit fortschreitender Zeitdauer immer weiter ab, das Absinken des E-Moduls verlangsamt sich dabei jedoch. Für eine unendlich lange Belastungsdauer stellt sich ein End-E-Modul E_∞ ein.

Viskoplastisches Verhalten

Bei ideal viskoelastischem Verhalten bildet sich die Dehnung nach Aussetzen der Belastung vollständig zurück. Man spricht daher auch von einem viskoelastischen Festkörperverhalten. Bleiben nach dem Aussetzen der Belastung permanente Dehnungen im Material zurück, spricht man von viskoelastischem Flüssigkeitsverhalten bzw. viskoplastischem Materialverhalten.

Unterschieden wird dabei in ein ideal-viskoplastisches Materialverhalten ohne Rückkriecheanteil, sowie in ein viskos-elastisch-plastisches Materialverhalten. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten eines ideal-viskoplastischen Materials wird in Abbildung A.11 dargestellt. Das Aufbringen einer konstanten Spannung über eine bestimmte Zeit erzeugt einen idealelastischen Dehnungsanteil sowie eine innerhalb der Belastungsdauer konstante Dehngeschwindigkeit.

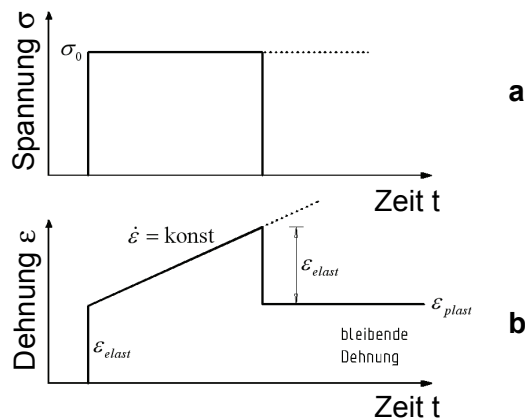


Abbildung A.11: Ideal viskoplastisches Materialverhalten ohne Rückkriecheffekte; a: zeitabhängige Spannungseinwirkung; b: resultierende Dehnung

Nach dem Aussetzen der Belastung bildet sich der elastische Teil der Dehnung sofort zurück. Der plastische Dehnungsanteil bleibt im Werkstoff zurück. Die Größe des plastischen Dehnungsanteils ist von der Belastungsdauer abhängig. Für eine kontinuierlich wirkende, in der Größe konstant aufgebrachte Dehnung bedeutet dies, dass die daraus resultierende Anfangsspannung σ_0 im Laufe der Belastungsdauer immer weiter absinkt und sich schließlich asymptotisch dem Wert Null annähert. Es findet also ein Entspannungsprozess statt, welcher unter anderem bei Verfahren zum thermischen Spannungsabbau in Gläsern eine Anwendung findet. Die Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ ist von der Viskosität des Stoffes abhängig, sie wächst also bei steigender Temperatur stark an.

Viskoplastisches Materialverhalten ist jedoch in der Regel untrennbar mit einem viskoelastischen Materialverhalten verbunden. Dies bedeutet, dass es neben dem plastischen, für bleibende Dehnungen verantwortlichen Materialverhalten auch immer ein Relaxationsverhalten aus viskoelastischen Materialeigenschaften besteht. In Abbildung A.12 ist das Spannungs-Dehnungs-Verhalten für dieses kombinierte viskos-elastisch-plastische Materialverhalten dargestellt.

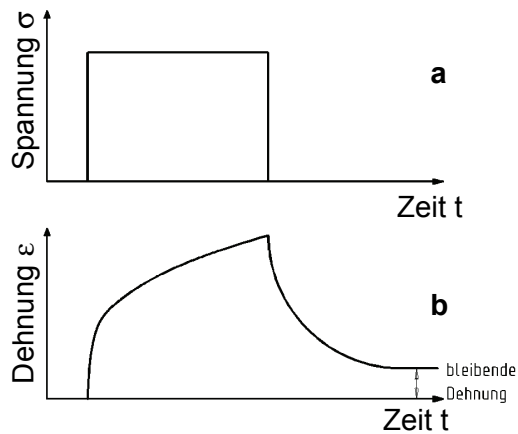


Abbildung A.12: Kriechkurve eines viskos-elastisch-plastischen Materials; a: zeitabhängige Spannungseinwirkung; b: resultierende Dehnung

Bei diesem Materialverhalten ist eine Mischung aus elastischen und plastischen Eigenschaften zu beobachten. Eine Beschreibung dieses Materialverhaltens erfolgt im Modell nach MAXWELL.

Modell nach MAXWELL

Eines der einfachsten Modelle, welche die mechanischen Vorgänge innerhalb viskoelastischer Materialien beschreiben, ist das Modell nach MAXWELL. Dieses Modell stellt einen Zusammenhang zwischen E-Modul und Viskosität her.

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten innerhalb eines MAXWELL-Elementes wird mit Hilfe einer Differentialgleichung erster Ordnung beschrieben (Silber, et al., 2005).

Für das kombinierte Feder-Stoßdämpfer-Modell (Abbildung A.13) gilt dann nach MAXWELL:

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2, \quad (\text{A.32})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_E + \varepsilon_\eta, \quad (\text{A.33})$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta}, \quad (\text{A.34})$$

$$\Delta \varepsilon = \dot{\varepsilon} \times \Delta t. \quad (\text{A.35})$$

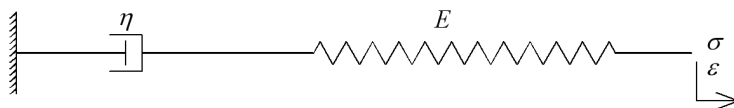


Abbildung A.13: Mechanisches Modell nach Maxwell (Eindhoven University of Technology, 2005)

Das Kriechverhalten wird nach MAXWELL beschrieben durch:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{\eta} \times t = \sigma_0 \left[\frac{1}{\eta} \times \left(t + \frac{\eta}{E} \right) \right] = \sigma_0 \times D(t). \quad (\text{A.36})$$

Das Relaxationsverhalten wird beschrieben mit:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \times E \times \exp\left(-\frac{E}{\eta} \times t\right) = \varepsilon_0 \times E \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_m}\right) \quad (\text{A.37})$$

$$\text{mit} \quad \tau = \frac{\eta}{E}.$$

Linear-viskoelastisches-Festkörperverhalten

Das linear-viskoelastische Festkörperverhalten beschreibt den Zusammenhang zwischen zeitabhängigen E-Modul E , End-E-Modul E_∞ und Viskosität eines Festkörpers. Grundlage dafür ist das Modell nach MAXWELL. Der Unterschied zu dem Modell nach MAXWELL besteht im Vorhandensein eines End-E-Moduls, wodurch die während eines mechanischen Vorgangs innerhalb des Materials erfolgten Verformungen gespeichert werden. Abbildung A.14 zeigt schematisch das mechanische Verhalten eines viskoelastischen Festkörpers.

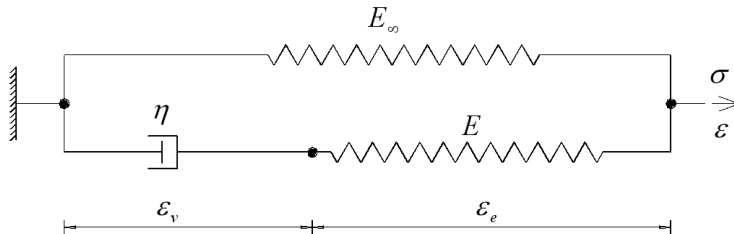


Abbildung A.14: Schematische Darstellung des viskoelastischen Festkörperverhaltens (Eindhoven University of Technology, 2005)

Der zeitabhängige E-Modul lässt sich nach (Silber, et al., 2005) wie folgt berechnen:

$$E(t) = E_\infty + E \times \exp(-t/\tau), \quad (\text{A.38})$$

$$\text{mit } \tau = \frac{\eta}{E}.$$

Der E-Modul eines viskoelastischen Materials besteht damit aus einer konstanten Komponente und einem Anteil, welcher von der Viskosität sowie der Zeit bestimmt wird:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_\infty + \sigma_{ve}, \quad \sigma_{ve} = E \times \epsilon_e, \quad \rightarrow \quad \dot{\epsilon}_e = \frac{1}{E} \dot{\sigma}_{ve}, \\ \dot{\epsilon} &= \dot{\epsilon}_v + \dot{\epsilon}_e, \quad \epsilon = \frac{1}{E_\infty} \sigma_\infty, \\ \dot{\epsilon}_v &= \frac{1}{\eta} \sigma_{ve}. \end{aligned} \quad (\text{A.39})$$

Mittels differentieller Gleichungen lassen sich Spannungen sowie Dehnungen innerhalb eines viskoelastischen Körpers numerisch berechnen. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten für einen viskoelastischen Festkörper lässt sich wie folgt beschreiben (Silber, et al., 2005):

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_\infty + \sigma_{ve} = E_\infty \times \epsilon + \eta \times \dot{\epsilon}_v \\ &= E_\infty \times \epsilon + \eta(\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_e) = E_\infty \times \epsilon + \eta \times \dot{\epsilon} - \eta \frac{\dot{\sigma}_{ve}}{E} \\ &= E_\infty \times \epsilon + \eta \times \dot{\epsilon} - \frac{\eta}{E} (\dot{\sigma} - E_\infty \times \dot{\epsilon}) \quad \rightarrow \\ \sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} &= E_\infty \times \epsilon + \frac{\eta \times (E + E_\infty)}{E} \dot{\epsilon}. \end{aligned} \quad (\text{A.40})$$

Vielparameter-Viskoelastizitätsmodell

In der Numerik wird häufig ein abgewandeltes viskoelastisches Festkörpermodell verwendet, um zeitabhängige Verformungsvorgänge zu beschreiben. Dieses Modell besteht zusätzlich zu dem in Abbildung A.14 dargestellten Modul aus einer Vielzahl unterschiedlicher Feder-

Dämpferelementen. Eine schematische Darstellung des Vielparameter-Viskoelastizitätsmodells wird in Abbildung A.15 gezeigt.

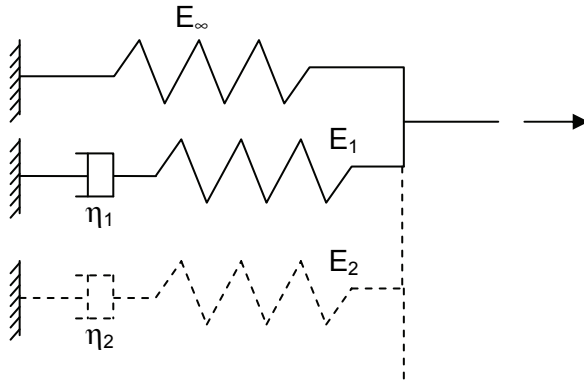


Abbildung A.15: Schematische Darstellung eines Vielparameter-Viskoelastizitätsmodells (Rust, 2009)

Das Vielparameter-Viskoelastizitätsmodell stellt eine aus numerischer Sicht günstige Variante der Materialbeschreibung dar, die es ermöglicht, sowohl die Spannungs- als auch die E-Modulanteile zu superponieren. Der E-Modul des Materials kann damit in Abhängigkeit der Zeit beschrieben werden mit:

$$E(t-t_0) = \sum_{i=1}^n E_i(t-t_0). \quad (\text{A.41})$$

Für einen Relaxationsvorgang, der zum Zeitpunkt t_0 beginnt, gilt somit:

$$\sigma(t) = E(t-t_0) \times \epsilon_0. \quad (\text{A.42})$$

Die Darstellung des zeitabhängigen E-Moduls wird als Prony-Reihe bezeichnet. Prony-Reihen finden bei vielen numerischen Formulierungen Verwendung, die viskose Effekte beschreiben sollen.

BURGERS-Modell

Das BURGERS-Modell stellt eine Kopplung aus dem MAXWELL- und dem KELVIN-VOIGT-Modell dar. Es wird häufig für die numerische Beschreibung von Polymeren verwendet und ermöglicht es, viskoelastische und viskoplastische Effekte zu beschreiben. Eine schematische Darstellung des BURGERS-Modells erfolgt in Abbildung A.16.

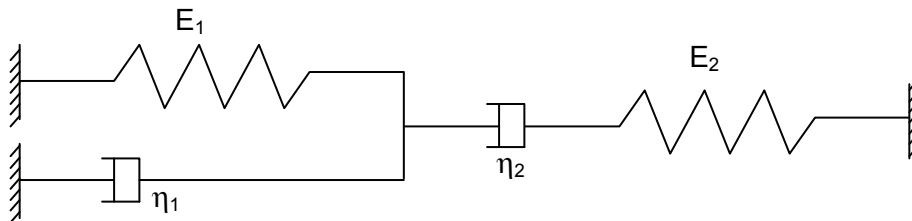


Abbildung A.16: Schematische Darstellung des BURGERS-Modells nach (Rust, 2009)

Die mechanische Formulierung des BURGERS-Modells lautet (Eschl, 2001; Rust, 2009):

$$\epsilon(t) = \epsilon_{\text{Hooke}} + \epsilon_{\text{Newton}} + \epsilon_{\text{Kelvin-Voigt}}, \quad (\text{A.43})$$

$$\epsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_2} + \frac{1}{\eta_2} + \frac{1}{E_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} \times t\right) \right) \right]. \quad (\text{A.44})$$

A.1.3 Mechanische Formulierung von Betonwerkstoffen

Die mechanische Modellierung von Beton untergliedert sich in zwei grundlegend verschiedene Bereiche:

- ungerissener Zustand (auch als Zustand I bezeichnet)
- gerissener Zustand (auch als Zustand II bezeichnet).

Für den Fall des ungerissenen Zustands des Betons kann von einem annähernd isotropen Materialverhalten ausgegangen werden. Unter Zugbeanspruchung weist der Werkstoff Beton jedoch eine weit geringere Festigkeit auf als unter Druckbeanspruchung. Daher muss bei der mechanischen Formulierung von Beton immer auch von einem gerissenen Zustand ausgegangen werden. Der Beton kann damit im Zugbereich keine Normalspannungen mehr übertragen. Auf den Druckbereich des Betons hat das jedoch keinen Einfluss, sodass hier die volle Steifigkeit aus Zustand I angesetzt werden kann.

$$\begin{aligned} E_{\text{Zustand I}}^- &= E_{\text{Zustand I}} \\ E_{\text{Zustand II}}^+ &= 0. \end{aligned} \tag{A.45}$$

Eine Schubübertragung im gerissenen Bereich ist jedoch weiterhin möglich, solange die maximale Rissweite auf einen hinreichend kleinen Betrag begrenzt bleibt.

A.1.4 Abbildung räumlich stochastisch verteilter Faser-Matrix-Systeme

Bei räumlich verteilten multiaxialen Faser-Matrix-Systemen kann bei der Betrachtung in der Mesoebene und hinreichendem Betrachtungsabstand von einzelnen Fasern von einem verschmiert isotropen Materialverhalten ausgegangen werden. Bedingung dafür ist jedoch, dass die Fasern im System in ihrer Richtung stochastisch verteilt liegen. In diesem Fall gilt:

$$E_x = E_y = E_z. \tag{A.46}$$

A.1.5 Abbildung von Adhäsionsschichtversagen

Bei der rechengestützten Bemessung von Klebverbindungen wird i.d.R. von dem Ansatz ausgegangen, dass die im Grenzzustand auftretenden Beanspruchungen in der Klebfuge die als zulässig definierten Beanspruchungen unterschreiten.

Bei der numerischen Betrachtung von Klebverbindungen im Versagenszustand ist es möglich, Auswirkungen eines Adhäsionsversagens auf das mechanische Gesamtsystem zu untersuchen. Dabei kommt ein Modell zum Einsatz, das es ermöglicht, bei Überschreitung eines definierten Beanspruchungszustandes eine Entfestigung in der Klebfuge zu beschreiben. Die numerische Analyse des Adhäsionsschichtversagens erfolgt i. Allg. über Interface-Elementformulierungen. Die Nutzung dieser Elemente erlaubt eine numerische Beschreibung der Klebverbindung im Versagenszustand. Dabei können den Interface-Elementen definierte Grenzkriterien vorgegeben werden. Bei Überschreitung dieser Kriterien öffnen sich die Interface-Elemente im mechanisch überbeanspruchten Bereich (Madenci, et al., 2006; Shukla, et al., 2010). Die erforderlichen Konstanten dabei sind:

- maximale Vergleichsspannung σ_{\max} kombiniert aus Schub und Zugbeanspruchung,
- Spalt $\bar{\delta}_n$ normal zur Klebfläche bei Auftreten von σ_{\max} und reiner Zugkraftbeanspruchung,
- Schubweg $\bar{\delta}_t$ bei Auftreten von σ_{\max} für eine reine Schubbeanspruchung.

Das Oberflächenpotential $\Phi(\delta)$ wird dann nach (Xu, 1994) wie folgt beschrieben:

$$\Phi(\delta) = e \times \sigma_{\max} \times \bar{\delta}_n \left[1 - \left(1 + \frac{\bar{\delta}_n}{\bar{\delta}_t} \right) \times \exp\left(-\frac{\bar{\delta}_t^2}{\bar{\delta}_n^2}\right) \times \exp\left(-\frac{\bar{\delta}_n}{\bar{\delta}_t}\right) \right], \quad (\text{A.47})$$

mit: $\bar{\delta}_n$: Abstand in Normalenrichtung,

$\bar{\delta}_t$: Abstand in Scherrichtung,

σ_{\max} : maximale kombinierte Zug- und Schubspannung,

$\bar{\delta}_n$: Abstand in Normalenrichtung bei maximaler Zugspannung ohne Schubspannungsanteil,

$\bar{\delta}_t$: Abstand in Scherrichtung für die maximale Schubspannung bei:

$$\bar{\delta}_t = \frac{\sqrt{2}}{2} \times \bar{\delta}_n$$

Die bei einer Verbindungsauftrennung erforderliche Arbeit, unterteilt in Schälarbeit und Schubarbeit, ist definiert mit:

$$\Phi_n = e \times \sigma_{\max} \times \bar{\delta}_n \text{ bei ausschließlichem Wirken von Normalkraft,} \quad (\text{A.48})$$

$$\Phi_t = \sqrt{2}e \times \tau_{\max} \times \bar{\delta}_t \text{ bei ausschließlich angreifender Scherkraft.} \quad (\text{A.49})$$

Die bei einer Verschiebung der Interface-Schichten auftretenden Kräfte lassen sich definieren mit:

$$T = \frac{d\Phi(\delta)}{d\delta}. \quad (\text{A.50})$$

Die bei einer Belastung der Verbindungen auftretenden Normalkräfte T_n und Schubkräfte T_t werden beschrieben mit:

$$T_n = e \times \sigma_{\max} \times \frac{\bar{\delta}_n}{\bar{\delta}_t} \times \exp\left(-\frac{\bar{\delta}_t^2}{\bar{\delta}_n^2}\right) \times \exp\left(-\frac{\bar{\delta}_n}{\bar{\delta}_t}\right), \quad (\text{A.51})$$

$$T_t = 2e \times \sigma_{\max} \times \frac{\bar{\delta}_n}{\bar{\delta}_t} \times \frac{\bar{\delta}_t}{\bar{\delta}_t} \times \left(1 + \frac{\bar{\delta}_n}{\bar{\delta}_t} \right) \times \exp\left(-\frac{\bar{\delta}_t^2}{\bar{\delta}_n^2}\right) \times \exp\left(-\frac{\bar{\delta}_n}{\bar{\delta}_t}\right). \quad (\text{A.52})$$

Für einen dreiaxialen Spannungszustand mit zwei Schubkomponenten δ_{t1} und δ_{t2} ermittelt sich die Gesamtschubkomponente mit:

$$\bar{\delta}_t = \sqrt{\delta_{t1}^2 + \delta_{t2}^2}. \quad (\text{A.53})$$

Die Gesamtarbeit $\varphi(\delta)$ ist dabei unabhängig vom Spannungszustand konstant. Für den Fall, dass eine Schubbeanspruchung ausschließlich auftritt, gilt:

$$\tau_{\max} = \sqrt{2}e \times \sigma_{\max} \times \frac{\bar{\delta}_n}{\bar{\delta}_t}. \quad (\text{A.54})$$

Die exponentielle Abbildung der Klebschicht über eine Interface-Formulierung stellt eine robuste Modellierungsvariante dar und ermöglicht damit die numerische Abbildung von Klebverbindungen im Versagenszustand. Für eine ausschließliche Normalkraft- (Abbildung A.17) bzw. Schubkraftbeanspruchung (Abbildung A.18) ist die Reaktion des Klebverbindungsmodells für folgende Materialparameter dargestellt:

- $\sigma_{\max} = 100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$,
- $\bar{\delta}_n = 0,01 \text{ mm}$,
- $\bar{\delta}_t = 0,005 \text{ mm}$.

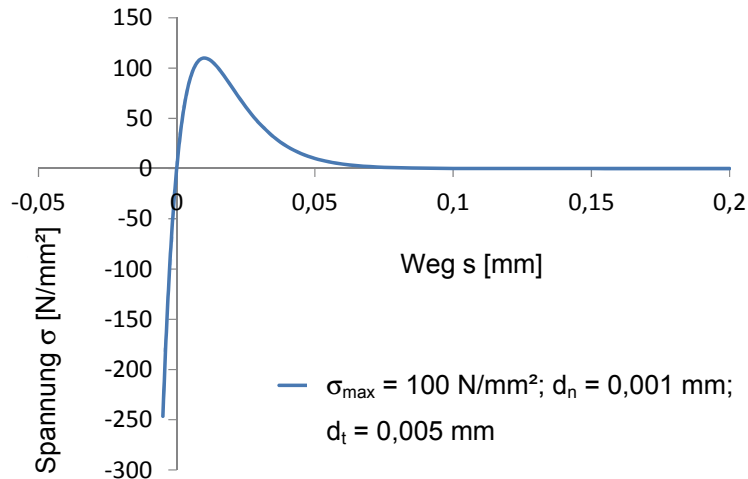


Abbildung A.17: Modellierung von einer Klebverbindung mit exponentiellem Verlauf / Reaktion auf Schälbeanspruchung

Im Druckbereich weist das Materialmodell aufgrund der Exponentialfunktion eine hohe Steifigkeit auf. Für eine genauere Abbildung von Klebverbindungen im Druckbereich kann das Materialmodell zusätzlich mit einer Lagrange-Kontaktformulierung (Bathe, 2002) überlagert werden, und Durchdringungen können effektiv reduziert werden. Im Zugbereich führt die exponentielle Materialdefinition zu einem Abfallen der Steifigkeit bei Überschreitung von $\bar{\delta}_n$.

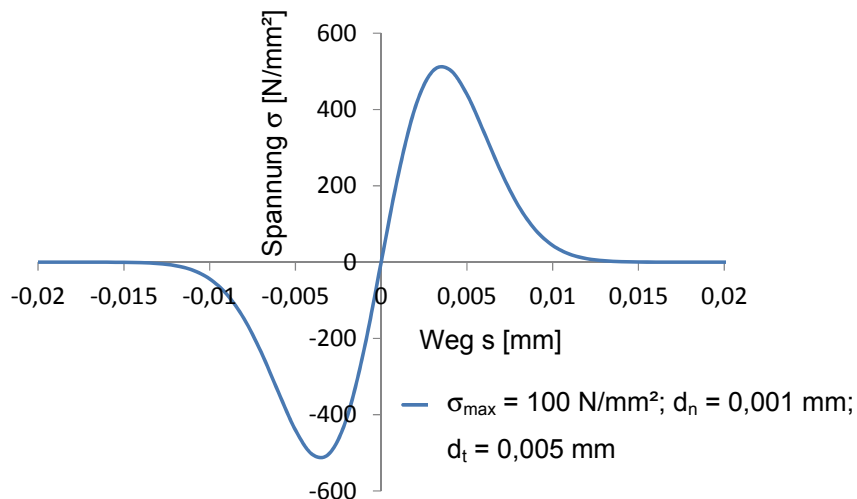


Abbildung A.18: Mechanisches Modell einer Klebverbindung mit exponentieller Reaktion auf Schubbeanspruchung

Für den Fall der ausschließlichen Schubbeanspruchung weist das Materialmodell ein richtungsunabhängiges Verhalten auf. Bei zyklischen Beanspruchungen mit Belastungs- und Entlastungszyklen können Vorschädigungseffekte aufgrund der Materialdefinition nicht abgebildet werden. Damit ist der Anwendungsbereich des Materialmodells auf richtungsgebundene Belastungsabbildungen beschränkt (Madenci, et al., 2006; Shukla, et al., 2010).

A.1.6 Nominalspannung und wahre Spannungen

Die aus dem Kraft-Verformungsdiagramm einer Zugprobe umgerechneten Spannungswerte wie Zugfestigkeit, Dehngrenze usw. entsprechen nicht der wahren Spannung im Material. Die Ursache liegt in der Berechnung der Spannung, die i.d.R. auf den Anfangsquerschnitt bezogen wird. Der tatsächliche Querschnitt unter Belastung ist aber aufgrund von Querdehnung und Einschnüreffekten kleiner als der Ausgangsquerschnitt. Bei duktilen Werkstoffen und einer elastisch-plastischen Verformung ist die Veränderung der Probengeometrie wie in Abbildung A.19 dargestellt als Einschnürung nach dem Zugversuch sicht- und messbar. Unterschieden wird damit zwischen der wahren Spannung σ_{wahr} und der nominellen Spannung σ_{nominell} , die auch als Ingenieurspannung bezeichnet wird. Die wahre Zugfestigkeit eines Werkstoffs im Augenblick des Bruchs ist damit höher als die aus einem Kraft-Verformungsdiagramm, basierend auf dem Ausgangsquerschnitt der errechneten Festigkeit (Bathe, 2002). Bei Metallen ist bis zum Erreichen der Dehngrenze der Unterschied zwischen wahrer Spannung und nomineller Spannung i.d.R. vernachlässigbar gering.

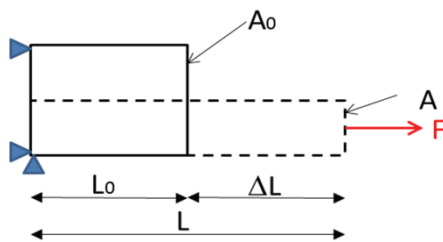


Abbildung A.19: Querschnitt einer Zugprobe unter Annahme von Volumenkonstanz

Bei großen Dehnungen wird unterschieden in

- Ingenieurdehnungen und
- wahre Dehnung.

Die Ingenieurdehnung ist definiert als:

$$\epsilon_{\text{Ing.}} = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{A.55})$$

Inkrementell kann man dafür schreiben:

$$\epsilon = \sum \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{A.56})$$

Durch Integration der Dehnung über die Länge L erhält man:

$$\epsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln(L) - \ln(L_0) \quad (\text{A.57})$$

Die wahre Dehnung wird beschrieben mit:

$$\epsilon_{\text{wahr}} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + \epsilon_{\text{Ing.}}) \quad (\text{A.58})$$

Die Umrechnung der wahren Dehnung in eine Ingenieurdehnung erfolgt somit nach:

$$\varepsilon_{\text{Ing.}} = \exp(\varepsilon_{\text{Wahr}}) - 1. \quad (\text{A.59})$$

Abbildung A.20 zeigt den Unterschied zwischen Ingenieurdehnungen und wahren Dehnungen. Bei geringen Dehnungen ist der Unterschied zwischen $\varepsilon_{\text{Ing.}}$ und $\varepsilon_{\text{Wahr}}$ gering. Bei Dehnungen $\varepsilon > 10\%$ sollten diese Unterschiede berücksichtigt werden.

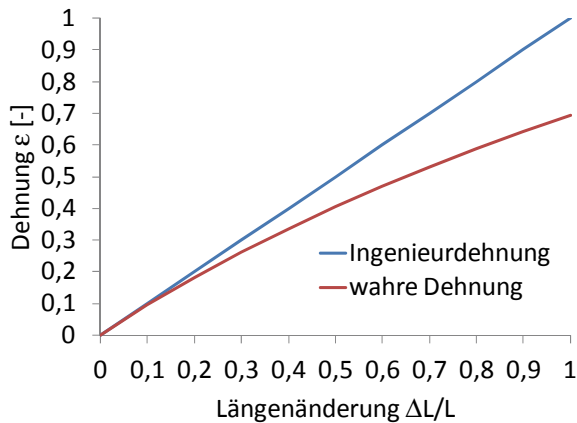


Abbildung A.20: Ingenieurdehnung und wahre Dehnung in Abhängigkeit der Längenänderung

In plastischen Materialbereichen gilt i. Allg. eine Volumenkonstanz.

$$V = A \times (L_0 + \Delta L) = A_0 \times L_0 = V_0, \quad (\text{A.60})$$

$$A = A_0 \frac{L_0}{L_0 + \Delta L} = A_0 \frac{1}{1 + \varepsilon_{\text{Ing.}}}, \quad (\text{A.61})$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} (1 + \varepsilon_{\text{Ing.}}) = \sigma_{\text{Ing.}} \times (1 + \varepsilon_{\text{Ing.}}). \quad (\text{A.62})$$

Nach Beginn der Einschnürung besteht nur noch die Möglichkeit einer lokalen Betrachtung der Spannungs-Dehnungsbeziehung im Bereich der Einschnürung. Die wahre Spannung nimmt im eingeschnürten Bereich immer mehr zu. Das kann jedoch nicht aus den Maschinendaten ermittelt werden, da hier i. Allg. ein Abfall der Kraft zu verzeichnen ist.

Eine Möglichkeit zur Ermittlung der wahren Spannungs-Dehnungs-Beziehung auch nach Beginn lokaler Einschnürungen einer Probe besteht in der Durchführung eines sogenannten instrumentierten Zugversuches, bei dem während des Versuchs kontinuierlich neben der Kraft auch der wahre Querschnitt gemessen wird. Eine Möglichkeit ist die Anwendung spezieller fotografischer Anwendungen, wie z. B. ARAMIS (Krenkel, 2009).

A.2 Anforderungen an Bemessungskonzepte

Die Nutzung wirtschaftlicher und nachhaltiger Konzepte in der Bauindustrie setzt die Anwendung wissenschaftlich fundierter Bemessungsansätze voraus (Graubner, et al., 2003). Dabei wird immer eine Abwägung von Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsaspekten vorgenommen. Bei der Bemessung von Bauteilen sind viele unterschiedliche Kriterien zu analysieren und in der Folge zu bewerten. So sind beispielsweise die Schadensfolgen bei Beschädigung oder Ausfall eines nicht redundant abgesicherten tragenden Bauteils kritischer zu bewerten als der Ausfall eines untergeordneten oder redundant abgesicherten Bauteils. Besonders differenziert wird eine Schadensfolge bewertet, wenn diese mit dem Verlust von Leib und Leben

verbunden ist. Untersuchungen, die sich mit der gesellschaftlichen Akzeptanz von Todesfällen im Alltag beschäftigen, nennen hier einen zulässigen Wert von 10^{-6} /Jahr. Dieser Wert wird als „de minimis risk“ bezeichnet. Ein Risiko, das diesem oder einem geringeren Wert entspricht, wird als höhere Gewalt interpretiert (Proske, 2004). Tabelle A-1 zeigt ausgewählte Sterbehäufigkeiten pro Jahr.

Ursache	relative Sterbehäufigkeit im
Deutscher Soldat im 2. Welt-	$7,0 \times 10^{-2}$ /Jahr
Krebs (USA 1999)	$5,7 \times 10^{-3}$ /Jahr
Autofahren	$2,2 \times 10^{-4}$ /Jahr
Bauarbeit	$1,7 \times 10^{-4}$ /Jahr
Haushalt	$1,0 \times 10^{-4}$ /Jahr
Flugverkehr (D 1988)	$1,6 \times 10^{-6}$ /Jahr
Bauwerkversagen	$1,0 \times 10^{-7}$/Jahr
Blitzschlag (U.K.)	$1,0 \times 10^{-7}$ /Jahr

Tabelle A-1: Sterbehäufigkeiten pro Jahr nach (Proske, 2003; Proske, 2004)

Die durchschnittliche Sterblichkeit pro Jahr infolge Bauwerkversagen liegt damit eine Zehnerpotenz unterhalb der Schwelle, die als höhere Gewalt angesehen wird. Dies ist bei Sicherheitsbetrachtungen und der Erstellung von Bemessungskonzepten zu berücksichtigen.

A.2.1 Sicherheitsbetrachtungen

Der Wunsch nach Sicherheit stellt einen der fundamentalsten Grundbedürfnisse des Menschen dar (Siebert, 2001; Farsch, 2010). Es ist jedoch festzustellen, dass eine absolute Sicherheit niemals hergestellt werden kann. Als Sicherheit wird vielmehr die Freiheit von unvertretbarem Risiko definiert. Als Risiko ist die Kombination der Wahrscheinlichkeit eines Schadeneintritts und seines Schadensausmaßes definiert. Damit kann ein Erzeugnis, ein Verfahren oder eine Dienstleistung nur relativ sicher sein. Die Sicherheit wird damit erreicht, dass das Risiko auf ein vertretbares Maß reduziert wird. Dieses „vertretbare Risiko“ wird durch die Abwägung zwischen dem Ideal der absoluten Sicherheit und den vertretbaren Anforderungen an das Erzeugnis, das Verfahren oder die Dienstleistung ermittelt. Diese Anforderungen werden durch eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren definiert bzw. beeinflusst, wie z. B. Nutzen für den Anwender, Eignung für den vorgesehenen Verwendungszweck, Kostengünstigkeit und Konventionen in der betroffenen Gesellschaft. Ein vertretbares Risiko kann in einem iterativen Verfahren zur Risikobeurteilung (Risikoanalyse und Risikobewertung) und Risikominimierung erreicht werden (Deutsches Institut für Normung, 2008). Dieses Verfahren ist schematisch in Abbildung A.21 dargestellt.

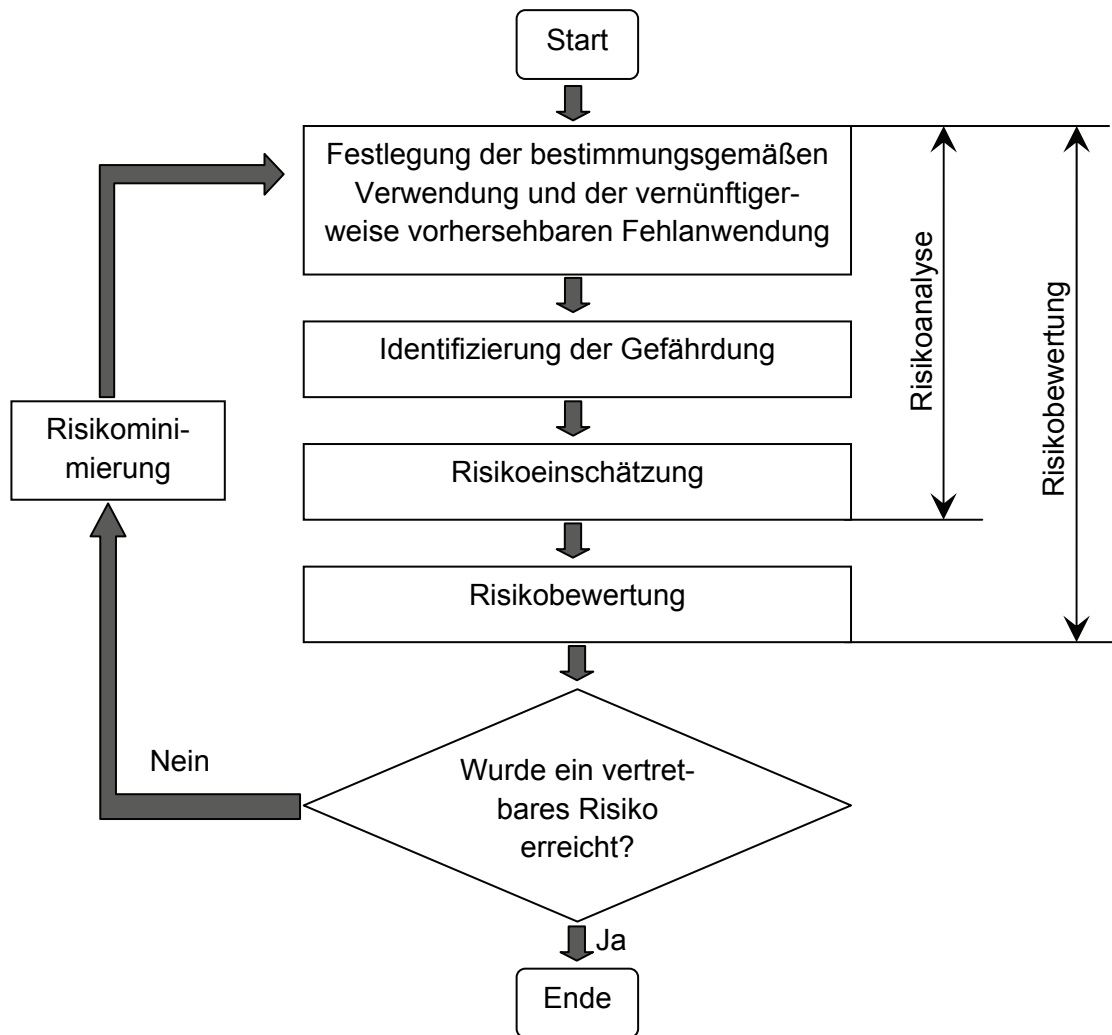


Abbildung A.21: Iteratives Verfahren zur Risikobeurteilung und Risikominimierung nach (Deutsches Institut für Normung, 2008)

Ein vertretbares Risiko wird durch die Reduzierung der Risiken erzielt. Dabei müssen die folgenden Eckpunkte Beachtung finden (Deutsches Institut für Normung, 2008):

- Identifizierung möglicher Anwendergruppen,
- Definition der bestimmungsgemäßen Verwendung bzw. der vernünftigerweise vorhersehbaren Fehlanwendung,
- Identifizierung der Gefährdung für alle Phasen der Produktnutzung, einschließlich Produktion und Entsorgung,
- Ermittlung der Risiken, die von den unterschiedlichen Gefährdungen und Anwendergruppen ausgehen,
- Entscheidung über Vertretbarkeit des Risikos.

Zur Risikominimierung können die Risiken, die in der Konstruktion oder dem Gebrauch liegen, minimiert werden. Die konstruktionsbedingten Risiken können reduziert werden mit:

- Sicherheitsbezogener Konstruktion,
- Schutzeinrichtungen,
- Sicherheitsrelevanten Informationen.

Das Risiko, was in der Konstruktion verbleibt, kann weiter durch eine Anpassung der Randbedingungen im Gebrauch reduziert werden. Dazu gehören:

- Zusätzliche Schutzeinrichtungen,
- Schulungsmaßnahmen,
- Persönliche Schutzausrüstung,
- Organisatorische Maßnahmen.

Das Risiko, welches nach diesen Minimierungsmaßnahmen verbleibt, wird als Restrisiko bezeichnet (Proske, 2003; Proske, 2004; Deutsches Institut für Normung, 2008).

A.2.2 Einwirkungen und Widerstände

Bei der Erstellung von Bemessungskonzepten wird unterschieden in die Grenzzustände von:

- Tragsicherheit und
- Gebrauchstauglichkeit.

Wird die Annahme vorausgesetzt, dass sowohl die Einwirkungsgröße als auch die Widerstandsgröße frei von Streuungen sind, so würde eine einfache Bemessung in der deterministischen Form

$$E < R, \quad (\text{A.63})$$

mit: E Kenngroße der Einwirkung,
mit: R Kenngroße des Widerstands,

ausreichend sein. Das entspricht jedoch nicht den natürlichen Gegebenheiten, da alle in der Natur vorkommenden Ereignisse in definierten Grenzen von zufällig verteilten Größen bestimmt werden. Das betrifft sowohl die Kenngroßen auf der Einwirkungsseite als auch die Kenngroßen der Widerstandsseite. Die Streuungen in den Einwirkungen werden i.d.R. als normalverteilt angenommen. Eine normalverteilte Wahrscheinlichkeitsdichte ist definiert mit (Bronstein, et al., 1999):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right), \quad (\text{A.64})$$

mit: x Argument bzw. Erwartungswert,
μ Mittelwert,
σ Standardabweichung.

Die den Materialeigenschaften zugehörige Dichtefunktion wird meist lognormalverteilt angenommen. Diese Annahme basiert z. T. auf Untersuchungen an organischen Werkstoffen, andererseits werden dadurch höhere Sicherheiten durch geringere Fraktilwerte generiert. Eine lognormalverteilte Wahrscheinlichkeitsdichte definiert sich mit:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \times x \sqrt{2\pi}} \times \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln(x)-\mu)^2\right). \quad (\text{A.65})$$

Stellt man die Verteilungsdichten der Einwirkungs- und Widerstandsseite gegenüber, so ist festzustellen, dass es Überschneidungsbereiche zwischen Einwirkungs- und Widerstandsseite gibt. In diesen Bereichen ist es möglich, dass die Einwirkung größer als der Widerstand ist und in der Folge ein Schaden eintreten kann.

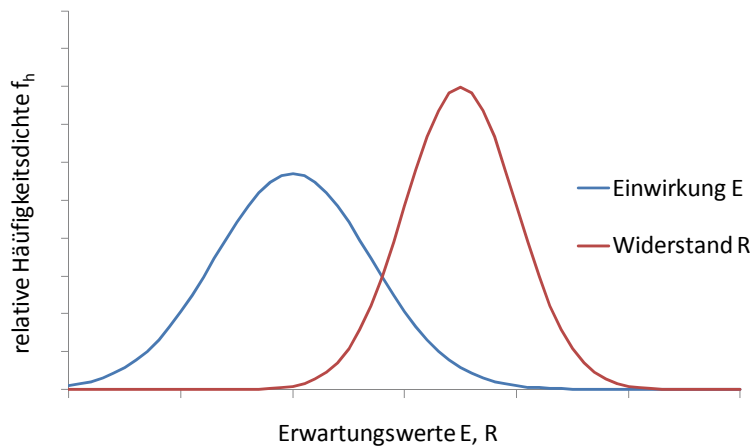


Abbildung A.22: Beispiel einer Verteilungsfunktion von Einwirkung und Widerstand

Dabei müssen die Folgen eines Schadens in der Betrachtung des Bemessungskonzeptes mit berücksichtigt werden (Deutsches Institut für Normung, 1981; Wörner, et al., 2001; Meinz, 2010). Eine Möglichkeit dazu bietet die Einteilung in Schadensklassen, wie in Tabelle A-2 dargestellt.

Sicherheits- klasse	Folgen der Gefährdung bezüglich der Tragfähigkeit	Folgen der Gefährdung bezüglich der Gebrauchstauglichkeit
1	keine Gefahr für Menschenleben und geringe wirtschaftliche Folgen	geringe wirtschaftliche Folgen und geringe Beeinträchtigung der Nutzung
2	Gefahr für Menschenleben und/oder mittlere wirtschaftliche Folgen	mittlere wirtschaftliche Folgen und mittlere Einschränkung der Nutzung
3	große Bedeutung der baulichen Anlage für die Öffentlichkeit	große wirtschaftliche Folgen und große Beeinträchtigung der Nutzung

Tabelle A-2: Einteilung von Sicherheitsklassen als Grundlage der Bemessung (Deutsches Institut für Normung, 1981)

Basierend auf diesen Sicherheitsklassen wird eine Quantifizierung der Ausfallwahrscheinlichkeit vorgenommen und wiederum in die beiden Zustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit unterschieden. Die vom Deutschen Institut für Normung empfohlenen Grenzwerte der Ausfallwahrscheinlichkeit für verschiedene Sicherheitsklassen sind in Tabelle A-3 dargestellt.

Sicherheits- klasse	Versagenswahrscheinlichkeit p_f Grenzzustand der Tragfähigkeit	Versagenswahrscheinlichkeit p_f Grenz- zustand der Gebrauchstauglichkeit
1	10^{-5}	5×10^{-3}
2	10^{-6}	1×10^{-3}
3	10^{-7}	2×10^{-4}

Tabelle A-3: Versagenswahrscheinlichkeiten für den Bezugszeitraum von einem Jahr (Deutsches Institut für Normung, 1981)

Nach DIN EN 1990 (Deutsches Institut für Normung, 2010) kann eine Beziehung zwischen der Versagenswahrscheinlichkeit p_f und dem Zuverlässigkeitsindex β in der Form:

$$p_f = \Phi(-\beta), \quad (\text{A.66})$$

mit: Φ kumulative Verteilungsfunktion für die standardisierte Normalverteilung

hergestellt werden.

A.2.3 Deterministische Bemessung

Bei einem deterministisch bestimmten Bemessungskonzept werden Einwirkungs- und Widerstandsgrößen gegenübergestellt und mit einem globalen Sicherheitsbeiwert abgesichert. Der Nachweis erfolgt dann mit:

$$E \leq R_{\text{zulässig}} = \frac{R}{\gamma} . \quad (\text{A.67})$$

Der globale Sicherheitsbeiwert deckt dabei alle Unsicherheiten auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite ab. Nachteil einer deterministischen Bemessung ist, dass spröde versagende Bauteile, wie z. B. Glas, mit diesem Bemessungskonzept nicht wirtschaftlich abgesichert werden können. Der resultierende globale Sicherheitsbeiwert geht immer von einer absoluten Sicherheit aus und nimmt bei stark streuenden Widerständen einen sehr hohen Wert an.

A.2.4 Probabilistische Bemessung

Die Vorteile einer probabilistischen Bemessung liegen in einer klaren Trennung zwischen Einwirkungs- und Widerstandsseite. Damit ist es möglich, die entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerte klar abzugrenzen und eine Bemessung unter wahrscheinlichkeitstheoretischen Gesichtspunkten durchzuführen. Das setzt jedoch umfangreiche Kenntnisse über die wahrscheinlichkeitstheoretische Verteilung aller Einflüsse und Widerstandsgrößen voraus. Es ist somit notwendig, für jede dieser Größen die „richtige“ Verteilungsfunktion zu finden, um entsprechende Teilsicherheitsbeiwerte festlegen zu können (Wörner, et al., 2001). Das setzt umfangreiche Untersuchungen zu den Einwirkungen und Widerständen voraus, auf die vielfach nur unzureichend zurückgegriffen werden können. Somit können verschiedene Teilsicherheitsbeiwerte nur abgeschätzt werden, was eine wissenschaftlich fundierte Bemessung erschwert. Aus Sicherheitsüberlegungen werden diese Teilsicherheitsfaktoren dann oft sehr konservativ festgelegt und in ein System eingerechnet, das eine Genauigkeit der Bemessung suggeriert, die in Wirklichkeit nicht vorhanden ist. Andererseits werden bei den unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerten Faktoren wie Zeit oder Temperatur oder umgebende Medien mit einbezogen, was selbst bei einfachen Bemessungszuständen zu einer umfangreichen Nachweisführung führt (Wörner, et al., 2001).

A.2.5 Korrelation aus Windeinwirkung und Temperatur

Unterschiedliche Einwirkung, die im Bauwesen bei der Bemessung zu beachten sind, können nicht immer entkoppelt voneinander betrachtet werden. Bei der Kombination aus Wind und Temperatureinwirkung kann ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen den auftretenden maximalen Windgeschwindigkeiten und der Tageshöchsttemperatur festgestellt werden. Untersuchungen hierzu wurden in Aachen geführt (Wellershoff, 2006) und belegen, dass hohe Windgeschwindigkeiten nur bei Temperaturen um ca. $T = 15\text{ °C}$ auftreten. Abbildung A.23 zeigt die Korrelation aus gemessenen Tageshöchsttemperaturen und zugehörigen maximalen Windgeschwindigkeiten nach (Wellershoff, 2006).

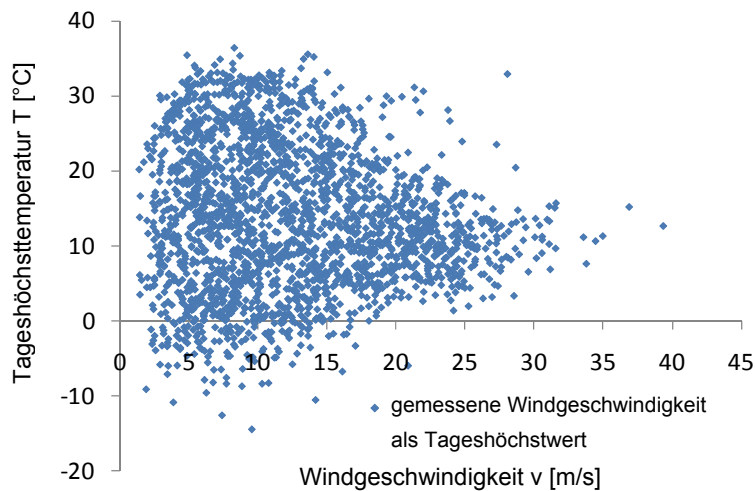


Abbildung A.23: Korrelation aus maximaler Tageswindgeschwindigkeit und Tageshöchsttemperatur (Wellershoff, 2006)

Bei der Bemessung von Hybridelementen, bei denen Kunststoffe strukturell lastabtragende Funktionen übernehmen, ist diese Untersuchung von besonderer Bedeutung. Durch sie wird gezeigt, dass eine Überlagerung von Temperaturlastfällen $T = 80\text{ °C}$ mit maximalen Windbeanspruchungen technisch nicht sinnvoll erscheint. Damit kann eine sehr wirtschaftliche Bemessung erfolgen, die speziell den stark temperaturabhängigen mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen entgegen kommt.

A.3 Verbindungstechnologien des Stahlbaus

A.3.1 Schraub- und Bolzenverbindungen

Die Anwendung lokaler Verbindungstechniken mit Schrauben, Nieten und Bolzen findet vor allem im Stahl- und Holzbau eine weite Verbreitung. Mit diesen Verbindungstechniken können lösbare und unlösbare Bauteilverbindungen hergestellt werden. Die Verbindungstechniken sind nahezu universell einsetzbar. Die Herstellung dieser Verbindungsformen erfolgt ohne Wärmeeinwirkung, was einen großen Vorteil speziell bei wärmeempfindlichen Bauteilen und Werkstoffen darstellt. Zur Tragwirkung von Schraub-, Bolzen- und Nietverbindungen liegen umfangreiche Versuchs- und Erfahrungswerte vor. Die Bemessung erfolgt mittels verschiedener Normen oder allgemeinen bautechnischen Zulassungen (Petersen, 1993; Deutsches Institut für Normung, 2007; Wiegand, et al., 2007; Gümpel, 2008; Pasternak, et al., 2010; Kindmann, et al., 2009). Diese Verbindungsformen werden hinsichtlich ihrer Anwendung und Bemessung ständig weiterentwickelt. Ein Ziel dieser Entwicklungen ist es, die größten systembedingten Nachteile dieser Verbindungsform wie:

- der lokalen Lasteinleitung und
- der Materialschwächung im Bereich der Verbindung

auszugleichen oder zumindest in seiner Wirkung abzuschwächen. Hier bieten vorgespannte Schraubverbindungen die Möglichkeit, durch eine flächige Wirkung der Verbindung den Bereich der Lasteinleitung zu vergrößern und damit Beanspruchungskonzentrationen zu minimieren. Weiterhin können Wechselbeanspruchungen, die zu negativen Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit führen, vermindert werden, wodurch sich ein breites Anwendungsfeld für vorgespannte Schraubverbindungen ergibt (Petersen, 1993; Wiegand, et al., 2007).

A.3.2 Schweißverbindungen

Die Anwendung unterschiedlicher Schweißverfahren ermöglicht die Herstellung kraftschlüssiger Verbindungen in einem sehr weiten Anwendungsbereich. Die Verbindungen können dabei entweder punkt- oder linienförmig ausgebildet sein. Damit lassen sich konzentrierte Beanspruchungen im Bereich der Verbindung vermeiden und Beanspruchungsspitzen reduzieren. Voraussetzung für die Anwendung eines Schweißverfahrens ist die Schweißseignung der zu verbindenden Werkstoffe. Schweißbare Werkstoffe sind:

- Metalle,
- Kunststoffe und
- Glas.

Es ist zu beachten, dass die Schweißseignung eines Werkstoffs immer von verschiedenen Randbedingungen und dem Einsatz spezifischer Schweißverfahren abhängt. Die Schweißverfahren und deren Anwendungsgebiete befinden sich in einer ständigen Weiterentwicklung. Die Schweißprozesssimulation stellt dabei ein wichtiges Werkzeug dar (Radaj, 1999).

Aktuelle Entwicklungen betreffen die Anwendung des Laserstrahlschweißens von Quarzglas. Mittels einer lokalen Erwärmung des Glases durch einen Laserstrahl ist es möglich, verschiedene Quarzglaselemente kraftschlüssig miteinander zu verbinden, wobei die optischen Eigenschaften des Quarzglases im Bereich der Verbindung erhalten bleiben (Hildebrand, 2008; Göbel, et al., 2008).

Die Möglichkeit der Herstellung einer kraftschlüssigen Verbindung zwischen zwei Bauteilen ohne Werkstoffübergang stellt einen wesentlichen Vorteil dieser Verbindungstechnologie dar.

Eine generelle Anwendung von Schweißverfahren wird jedoch durch die Forderung nach der Schweißseignung der zu verbindenden Werkstoffe und deren strukturellen Verträglichkeit untereinander behindert. Die Anwendung von Schweißverfahren führt meist zu starken lokalen Erwärmungen, bei denen die Eigenschaften der Ausgangswerkstoffe verändert werden. Ein Ansatz zur Reduzierung dieser starken lokalen Temperatureinwirkungen besteht in der Anwendung von Rührreißschweißverfahren, bei denen der Schweißvorgang im Wesentlichen durch ein mechanisches Vermengen der zu verbindenden Werkstoffe bei niedrigeren Temperaturen erfolgt (Moeller, 2008). Bei der Verbindung verschiedenartiger Werkstoffe zu hybriden Systemen besteht oft das Problem einer Materialunverträglichkeit, was ein Ausschlusskriterium für die Anwendung von Schweißverfahren darstellt. Für spezifische Problemstellungen, wie z. B. Schweißverbindungen zwischen höherfesten Baustählen unterschiedlicher Qualität, werden Lösungen erarbeitet, die auch eine Anwendung in Hybridsystemen zulassen (Kuhlmann, et al., 2008). Dennoch ist die Anwendung konventioneller Schweißtechnik, z. B. für die Herstellung einer strukturell wirksamen Verbindung zwischen Aluminium und Stahl oder CFK und Aluminium, nicht möglich. Für diese Anwendungsbereiche ist der Einsatz alternativer Verbindungstechnologien mit Schraub- oder Klebverbindungen erforderlich.

A.4 Klebverbindungen

A.4.1 Physikalisch abbildende Klebstoffe

Als physikalisch abbildende Klebstoffe definiert man ein bereits fertig ausgebildetes Polymer, das in eine Klebfuge eingebracht wird. Dazu findet ein physikalisches Verfahren Anwendung, das den Klebstoff in eine mehr oder weniger fließfähige Form bringt, um ihn später

im Klebspalt wieder verfestigen zu lassen (Habenicht, 2009). Den physikalisch abbindenden Klebstoffen können folgende Untergruppierungen zugeordnet werden:

- Lösungsmittelhaltige Nassklebstoffe,
- Dispersionsklebstoffe,
- Schmelzklebstoffe,
- Kontaktklebstoffe,
- Plastisole.

A.4.2 Chemisch härtende Klebstoffe

Chemisch härtende Klebstoffe, oft auch Reaktionsklebstoffe genannt, werden als einzelne chemische Bausteine für den Klebstoff in die Klebfuge eingebracht. Die chemische Reaktion der Bausteine miteinander führt zu einer Verfestigung. Grundsätzlich können chemisch härtende Reaktionsklebstoffe in ein- und mehrkomponentige Systeme eingeteilt werden.

1-Komponenten-Klebstoffe werden als gebrauchsfertig verkaufte Klebstoffe direkt in die Klebfuge eingebracht. Durch eine Veränderung der Umgebungsbedingungen härtet der Klebstoff dann aus. Die Veränderung der Umgebungsbedingung des Klebstoffs kann z. B. in einer Temperaturerhöhung, Zutritt von Luftfeuchtigkeit oder Kontakt mit einer Substratoberfläche bestehen. Chemische Reaktionen zwischen den Harzmonomeren und einem Härter führen zum Aufbau des Polymers.

2-Komponenten-Klebstoffe bestehen aus zwei räumlich getrennten chemischen Komponenten, die meist mit A und B bezeichnet werden. In den beiden Komponenten befinden sich Monomere als Grundbausteine des bei der Reaktion entstehenden Harzes. Eine der beiden Komponenten enthält Harzmonomere, während der andere den Härter enthält. Als weitere Inhaltsstoffe können Stabilisatoren, Thixotropiermittel, Beschleuniger, weitere Additive und Farb- oder Füllstoffe zum Einsatz kommen. Vor der Applikation müssen beide Komponenten im korrekten Verhältnis intensiv gemischt werden. Mit Beginn des Mischvorgangs startet die chemische Reaktion zum Kunststoffpolymer. Ein wichtiger Begriff ist dabei die Topfzeit, die die maximale Verarbeitungszeit des Klebstoffs nach Mischbeginn kennzeichnet. Die fortschreitende Reaktion bedingt ein stetiges Ansteigen der Viskosität und führt nach Überschreiten der Topfzeit dazu, dass die zu verbindenden Oberflächen nicht mehr vollständig zu benetzen sind. Als Aushärtezeit wird die Zeit definiert, die der Klebstoff benötigt, um in der Klebfuge abzubinden und schließlich die Endfestigkeit in der Klebfuge zu erreichen. Die Aushärtezeit ist stark von äußeren Einflüssen, insbesondere der Temperatur, abhängig. Eine Temperaturerhöhung führt zu einer beschleunigten Aushärtung und oft auch zu einer höheren Endfestigkeit, hat aber meist auch einen stärkeren Schrumpfvorgang und damit i.d.R. höhere Eigenspannungen in der Klebverbindung zur Folge. Die Verringerung der Aushärtemperatur führt zu einer Verlängerung der Aushärtezeit. Die Aushärtetemperatur darf dabei nicht beliebig verringert werden, da unterhalb einer Kristallisationstemperatur im Klebstoff ein Auskristallisieren der Klebstoffbestandteile erfolgt und die chemische Reaktion damit stoppt (Habenicht, 2009).

Eine Einteilung der chemisch härtenden Klebstoffe kann in folgende Untergruppierungen vorgenommen werden:

- Epoxidharz-Klebstoffe,
- Polyurethan-Klebstoffe,
- Strahlenhärtende Klebstoffe,
- Cyanacrylat-Klebstoffe,

- Methylmethacrylat-Klebstoffe,
- Anaerob härtende Klebstoffe,
- Silikone,
- Silanvernetzende Polymerklebstoffe,
- Phenol-Formaldehydharz-Klebstoffe.

Chemisch härtende Klebstoffe haben eine große Bedeutung in der Verwendung im Automobil- und Bauwesen und stellen in dieser Arbeit eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung von Hybridelementen dar.

Epoxidharz-Klebstoffe

Epoxidharz-Klebstoffe sind zweikomponentige Systeme, die aus Harz und Härter aufgebaut sind. Die für Epoxidharze verwendeten Polymerbausteine tragen an ihrem Ende sogenannte Epoxidgruppen. Die meist verwendeten Reaktionsprodukte, Bisphenol-A und Epichlorhydrin, bilden nach dem Vermischen mit dem Härter, der eine Amino- oder Mercaptogruppe enthält, ein stabiles Duroplast. Die Reaktion kann sowohl bei Raumtemperatur als auch bei höheren Temperaturen erfolgen. Der ausgehärtete Klebstoff weist eine sehr hohe Steifigkeit und Festigkeit auf und ist damit besonders geeignet für strukturelle Klebverbindungen, die mechanischen Belastungen ausgesetzt werden können (Habenicht, 2009). Das Versagen der Klebverbindung ist bei Überschreiten der mechanischen Beanspruchbarkeit vorwiegend geprägt von einem spröden Bruch. Eine Besonderheit stellen einkomponentige Epoxidharzklebstoffe dar, bei denen schon im Herstellungsprozess Harz- und Härterkomponenten im richtigen Verhältnis gemischt wurden. Die bei diesen Klebstoffsystemen eingesetzten Härter reagieren unter Raumtemperatur nur sehr langsam mit dem Harz und benötigen hohe Temperaturen von $T > 160\text{ °C}$ für die chemische Reaktion des Aushärtvorgangs.

Polyurethan-Klebstoffe

Polyurethan-Klebstoffe härten durch Polykondensation oder Polyaddition aus und sind als einkomponentige oder zweikomponentige Klebstoffe erhältlich. Einkomponentige Polyurethan-Klebstoffe härten unter Luftfeuchtigkeit oder Wärme aus. Zweikomponentige Polyurethan-Klebstoffe bestehen aus einer Isocyanat-Komponente und einem Polyol. Die mechanischen Eigenschaften des 2K-Polyurethanklebstoffs werden maßgeblich durch die Eigenschaften des Polyols bestimmt. Dabei üben die Kettenlänge und die Anzahl der Verzweigungen des Polyols maßgeblichen Einfluss auf das mechanische Verhalten des ausgehärteten Polyurethan-Klebstoffs aus. So können Polyurethan-Klebstoffe je nach ihrer Zusammensetzung auf mechanische Beanspruchung hart und spröde oder auch weich und elastisch reagieren. Die Steifigkeit der Polyurethan-Klebstoffe wird häufig in Shore-A- oder Shore-D-Härtegraden eingeteilt. Eine mit Polyurethan-Klebstoff hergestellte Verbindung weist i.d.R. eine geringere mechanische Beanspruchbarkeit auf als eine mit Epoxidharz-Klebstoffen hergestellte Verbindung. Vorteile bieten Verbindungen aus Polyurethan-Klebstoffen durch ihre im Vergleich mit anderen Klebstoffen hohe Bruchdehnung einer hohen Weiterreißfestigkeit (Habenicht, 2009).

Strahlenhärtende Klebstoffe

Strahlenhärtende Klebstoffe sind einkomponentige Klebstoffe, die durch radikalisierte Polymerisation zu festen Polymeren härten. Die Bildung der dafür notwendigen Startradikale wird durch Bestrahlung mit UV-Licht angeregt. Die Wellenlänge des UV-Lichts muss dabei speziell auf das jeweilige Klebstoffsystem abgestimmt sein (Habenicht, 2009). Eine weitere Voraussetzung ist die notwendige Transparenz eines der zu fügenden Bauteile in diesem UV-Wellenlängenbereich. Von besonderer Bedeutung für die Herstellung von Hybridelementen

sind UV-härtende Acrylate. Sie sind besonders für das Kleben von transparenten Substraten geeignet. Im flüssigen Zustand besteht das radikalisch vernetzte UV-Acrylat vorwiegend aus Monomeren und Fotoinitiatoren. In diesem Zustand lässt sich der Klebstoff aufgrund seiner geringen Viskosität sehr gut dosieren. Die Einwirkung von UV-Strahlung führt zur Spaltung der Fotoinitiatoren in freie Radikale. Die freien Radikale leiten die Bildung von Polymerketten ein. Der UV-Klebstoff besteht im ausgehärteten Zustand aus vernetzten Polymerketten. Wesentlicher Vorteil von strahlhärtenden Klebstoffen ist die gezielte Aushärtung unter UV-Licht, die gezielt gestartet werden kann, wenn das Bauteil wie gewünscht positioniert wurde. Die Aushärtung erfolgt dann sehr schnell, was in der Anwendung schnelle Taktzeiten garantiert. Rein UV-härtende Klebstoffe sind vollständig transparent und ermöglichen damit interessante Anwendungsbereiche, vor allem mit Glas und Kunststoff. Strahlenhärtende Klebstoffe, die im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts reagieren, weisen eine gelbliche Färbung auf und werden oft für Anwendungsfälle eingesetzt, bei denen eine Bestrahlung mit reinem UV-Licht nicht möglich ist. Ebenso ist die Kombination beider Varianten, UV-härtend und bei sichtbarem Licht härtend, weit verbreitet, da mit solch einem Klebstoffsystem ein großer Anwendungsbereich erschlossen wird. Strahlenhärtende Klebstoffe bieten im ausgehärteten Zustand eine hohe Verbindungsfestigkeit und sind damit geeignet für die Herstellung mechanisch beanspruchter Verbindungsbereiche. Im Bereich des mechanischen Versagenszustandes lassen sich unterschiedliche Versagensformen beobachten, von einem spröden Versagen bis zu einem duktilen elastisch-plastischen Versagenszustand. Ein duktiles Versagensbild wird durch eine Erhöhung der Klebschichtdicke gefördert, was auf der anderen Seite wiederum zu einem Abfall der maximalen Beanspruchbarkeit führt.

Cyanacrylat-Klebstoffe

Cyanacrylat-Klebstoffe sind einkomponentige Systeme und bestehen aus Estern der Cyanoacrylsäure. Diese Monomere reagieren durch eine Polymerisationsreaktion im Füge-spalt zu dem letztendlichen Klebstoffpolymer. Cyanacrylat-Klebstoffe sind besser bekannt unter dem Begriff Sekundenkleber, da sie eine sehr schnelle Aushärtung ermöglichen. Für die Aktivierung des Aushärtvorgangs ist das Vorhandensein polarer Gruppen, z. B. OH-Ionen, erforderlich, die auf der Fügeoberfläche vorliegen müssen. Die Polymerisation läuft sehr schnell ab, innerhalb weniger Sekunden ist so eine feste Verbindung hergestellt. Besonders geeignet für die Anwendung von Cyanacrylat-Klebstoffen sind Substrate, wie z. B. Metalle, die einen sehr dünnen Klebspalt ermöglichen (Habenicht, 2009). Bei größeren Spaltmaßen ist, im Vergleich zu anderen Klebstoffsystemen, ein relativ großes Schwindmaß des Klebstoffs während der Aushärtung zu beachten. Bei großflächigen Klebungen führt das Schwindmaß zu relativ hohen Eigenspannungen, was sich negativ auf die mechanische Beanspruchbarkeit auswirkt. Verbindungen, die mit Cyanacrylat-Klebstoffen hergestellt werden, sind nicht feuchtigkeits- oder temperaturstabil, da sich das Polymer unter entsprechenden Bedingungen wieder aufspaltet. Für die Herstellung kleiner, punktförmiger Verbindungsgeometrien ist das Klebstoffsystem gut geeignet. Klebverbindungen, welche auf Cyanacrylat basieren, weisen eine hohe Steifigkeit und Festigkeit auf, das Versagen der Klebverbindung erfolgt als Spröbruchversagen.

Klebstoffe ohne Verfestigungsmechanismus

Klebstoffe ohne Verfestigungsmechanismus sind typischerweise Haftklebstoffe, die nach dem Auftragen auf ein Trägermaterial dauerhaft hochviskos und klebrig bleiben und dann durch Andrücken auf ein Substrat aufgetragen werden können und dort dauerhaft ihre Klebeigenschaften aufweisen. Angewendet werden diese Klebstoffe oft zum Vorpositionieren von Klebverbindungen, die nachträglich mit einer strukturell tragfähigen Klebverbindung ver-

bunden werden sollen. Eine dauerhafte strukturell tragfähige Verbindung kann mit Klebstoffen ohne Verfestigungsmechanismus aufgrund der geringen mechanischen Beanspruchbarkeit und der Kriecheigenschaften des Klebstoffs nicht erzielt werden.

A.4.3 Klebstoffgerechtes Konstruieren in Beispielen

Beispiele einer mehr oder weniger guten klebgerechten Konstruktion sind in Abbildung A.24 für den Fall einer T-förmigen Verbindung dargestellt.

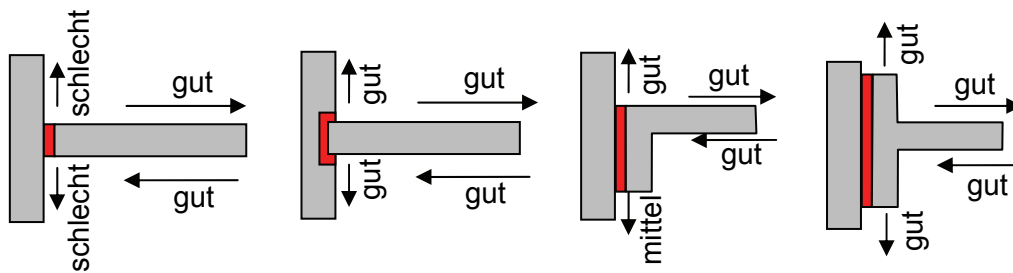


Abbildung A.24: Klebgerechte Konstruktion mit unterschiedlichen Qualitäten zur Herstellung eines T-Verbindungsstoßes (Brockmann, et al., 2005)

Dabei wird deutlich, dass eine klebgerechte Konstruktion immer anwendungsorientiert ausgelegt sein muss. Es müssen sowohl die geometrischen Verhältnisse als auch angreifende Beanspruchungen berücksichtigt werden. Ein generelles Ziel der klebgerechten Konstruktion besteht in der Vermeidung von Schälbeanspruchung und einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der Beanspruchung auf die gesamte Verbindungsfläche. Spitzenbeanspruchungen sollen damit minimiert werden.

Auch bei Klebverbindungen, die planmäßig ausschließlich Schubbeanspruchungen erhalten, bestehen Gestaltungsmöglichkeiten zur Herstellung qualitativ unterschiedlicher Verbindungsformen. Ziel einer klebstoffgerechten Konstruktion bleibt dabei immer die Minimierung der Maximalbeanspruchung in der Klebfuge. Danach können alle Klebverbindungen auf ihre mechanische Güte hin beurteilt werden.

Die numerische Abbildung von Klebverbindungen ermöglicht es, mechanisch komplexe Vorgänge innerhalb der Verbindung zu interpretieren und ein optimales Design für die Verbindung zu entwickeln. Dabei können gezielt Spannungsverteilungen analysiert werden, die in ingenieurmäßigen Bewertungen nicht ermittelt werden können. Weiterhin besteht die Möglichkeit, einzelne Effekte, wie z. B. Temperaturdehnungen oder mechanische Beanspruchungen, isoliert voneinander zu betrachten und somit ein besseres Systemverständnis zu erhalten. Bei der numerischen Abbildung von Klebverbindungen unter mechanischer Beanspruchung wird i.d.R. zuerst von einer ungeschädigten Klebverbindung ausgegangen.

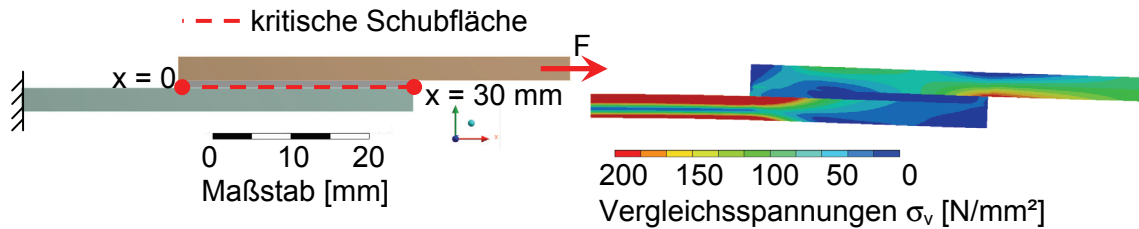
Bei der Betrachtung der Klebschicht unterscheidet man in zwei unterschiedliche Anwendungsfälle:

- Dünnschichtklebungen
 - Klebschichtdicke ist vernachlässigbar gering,
 - Modellierung des Klebstoffs kann vernachlässigt werden,
 - Substratoberflächen werden als direkt miteinander verbunden modelliert.
- Dickschichtklebungen
 - Klebschichtdicke kann nicht vernachlässigt werden,
 - Steifigkeit der Klebverbindung hat Einfluss auf die Systemsteifigkeit,

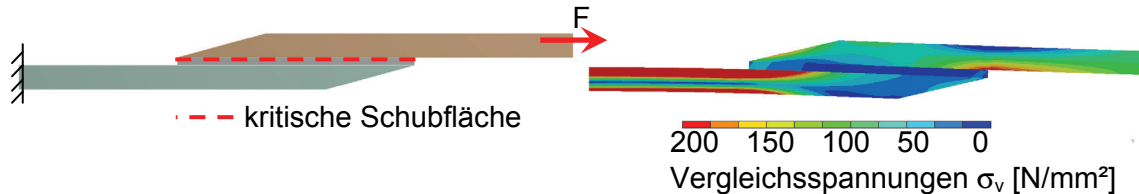
- Modellierung des Klebstoffs als Zwischenschicht zwischen den Substratoberflächen.

Für eine Auswahl möglicher schubbeanspruchter Klebverbindungen mit Stahl sind numerisch berechnete Beanspruchungen im Bereich der Klebverbindung in Abbildung A.25 dargestellt. Die zu verbindenden Bleche haben hier eine Dicke von $t = 3 \text{ mm}$ und werden mit einer Zugkraft beansprucht, die zu einer ingenieurmäßig definierten Schubspannung in der Klebfuge $\tau = 10 \text{ N/mm}^2$ führt. Dabei wird deutlich, dass insbesondere exzentrisch beanspruchte Verbindungen lokale Beanspruchungsspitzen aufweisen, die in den Anfangs- und Endbereichen der Verbindung zu Schälbeanspruchungen der Klebfuge führen.

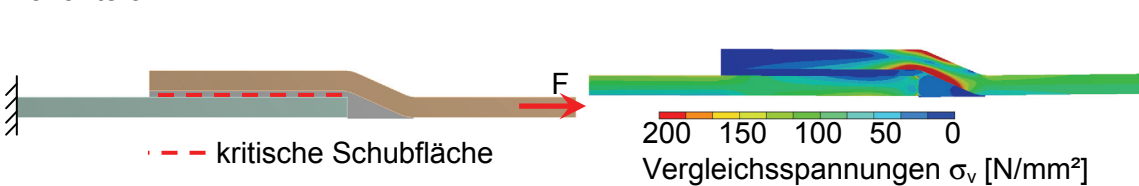
Variante 1



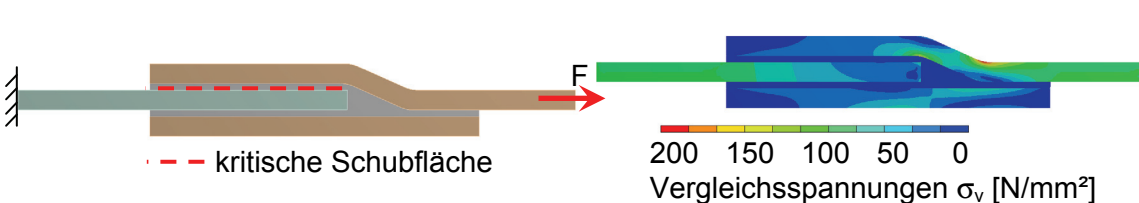
Variante 2



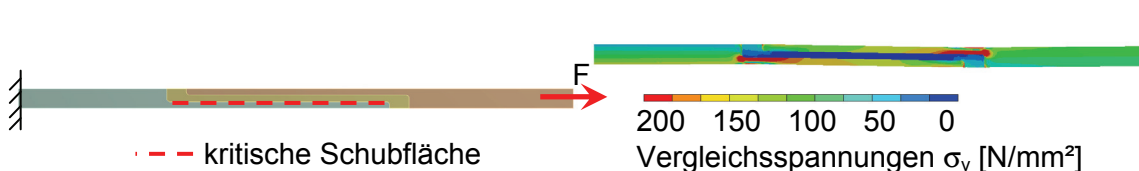
Variante 3



Variante 4



Variante 5



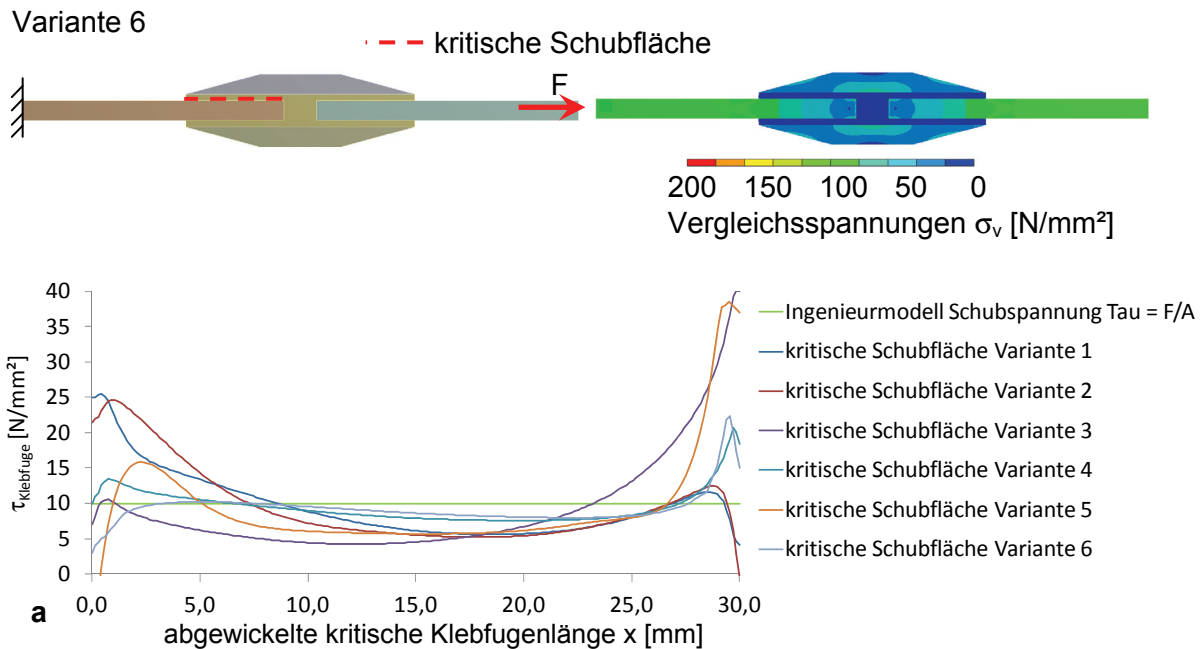


Abbildung A.25: Ausführungsvarianten und Ergebnisse der FEM-Analyse scherkraftbeanspruchter Klebverbindungen; a: Darstellung der kritischen Schubfläche

Die Vermeidung von geometrischen und strukturellen Kerben sowie starker Steifigkeitssprünge führt zu einer Glättung in der über die Klebfläche aufgetragenen Schubspannung. Das minimiert die auftretende Maximalbeanspruchung in der Klebfuge und die Beanspruchbarkeit der Klebverbindung steigt. Die Herstellung einer klebgerechten Konstruktion stellt einen wesentlichen Anteil an der qualitativen Ausbildung und strukturellen Beanspruchbarkeit der Verbindung dar.

A.4.4 Möglichkeiten der Oberflächenvorbehandlung

Physikalische Verfahren

Zu den physikalischen Verfahren zur Oberflächenvorbehandlung zählen alle Reinigungsverfahren, die die Substratoberfläche von Fremdpartikeln entfernen sollen. Verbreitet sind dabei Reinigungsverfahren, die mit wässrigen oder lösungsmittelhaltigen Reinigern erfolgen können. Der Reiniger muss dabei auf das Substrat abgestimmt sein, damit die Oberfläche des Substrats auf den Klebprozess optimal vorbereitet werden kann. Eine Temperaturerhöhung während des Reinigungsvorgangs führt i.d.R. zu einer erhöhten Löslichkeit der Reinigungsmittel und kann den Reinigungsvorgang beschleunigen. Der mögliche Temperaturbereich ist ebenfalls auf eine Verträglichkeit mit der Substratoberfläche hin abzustimmen. Eine weitere Möglichkeit der physikalischen Oberflächenvorbehandlung besteht in abrasiven Prozessen, wie Strahlprozessen (z. B. Stahlkies-, Korund- oder Glaskugelstrahlen) oder Schleifprozessen (häufig bei der Vorbehandlung von Stahl- oder Betonoberflächen eingesetzt).

Abbildung A.26 zeigt eine Betonoberfläche, (a) vor der Oberflächenvorbehandlung mit Zementschlempe als Substratoberfläche, (b) nach der abrasiven Vorbehandlung mit Diamantschleifmitteln.

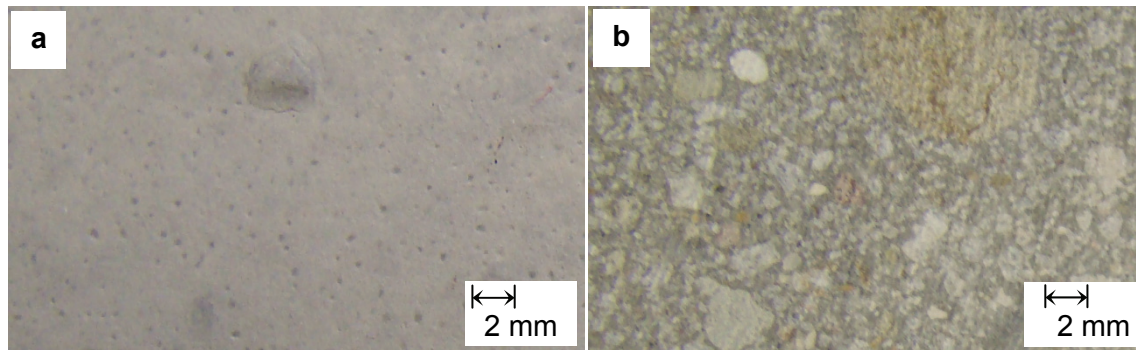


Abbildung A.26: Betonoberfläche C 45/55; a: vor der Vorbehandlung; b: nach Durchführung eines Diamantschleifprozesses

Ziel dieser Oberflächenbehandlung ist das Entfernen der Zementschlempe, die schlechtere mechanische Eigenschaften aufweist als der darunterliegende Beton. Gleichzeitig werden Verunreinigungen entfernt und die Adhäsionsfläche durch ein Anrauen vergrößert.

Physikalisch / thermische Verfahren

Zu den thermischen Vorbehandlungsverfahren zählen u.a.:

- Beflammen,
- Laser-Vorbehandlung,
- Ionenätzen / Sputtern,
- Plasmabehandlung (Niederdruckplasma / Atmosphärendruckplasma / Cronaverfahren).

Das Beflammen stellt vor allem bei Glas und Kunststoffen ein effektives Verfahren zur Oberflächenvorbehandlung dar. Dabei wird eine speziell erzeugte Flamme mit definiertem Abstand und konstanter Geschwindigkeit über die Substratoberfläche geführt. Die Flammenqualität muss dabei anhaltend gleich bleiben und ein konstantes Verhältnis zwischen Brenngas und Luftsauerstoff aufweisen, um ein über die Fläche homogenes Vorbehandlungsergebnis sicherzustellen. Ob die Beflammung in oxidierender oder reduzierender Weise eingesetzt wird, ist von der zu beflammenden Substratoberfläche abhängig. Durch die Beflammung wird die Reaktivität speziell von Kunststoffoberflächen erhöht, was zu einer besseren Benetzbarkeit der Substratoberfläche mit dem Klebstoff führt. Das Hinzuführen chemischer Substanzen während des Beflammungsvorgangs kann die Oberflächenqualität zusätzlich beeinflussen. Abbildung A.27 zeigt das Beflammen einer Floatglas-Oberfläche mittels Pyrosylverfahren.

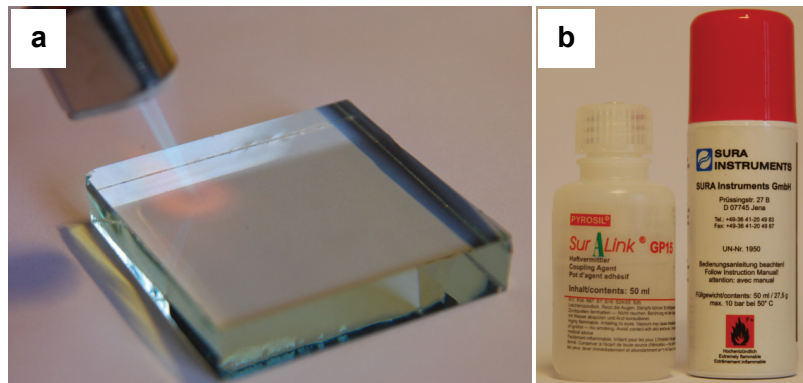


Abbildung A.27: Oberflächenvorbereitung mittels Pyrosylverfahren; a: Beflammung einer Glasoberfläche; b: Haftvermittler für unterschiedliche Vorbehandlungstechnologien

Das Beflammen stellt jedoch kein Reinigungsverfahren dar. Die Reinigung der Oberfläche muss in einem vorhergehenden Arbeitsschritt durchgeführt werden. Weiterhin ist darauf zu achten, dass der Energieeintrag, welcher der Substratoberfläche zugeführt wird, nicht zu hoch ist, da sonst mikroskopische Zerstörungen an der Substratoberfläche entstehen, die zu Delaminationserscheinungen in der Klebverbindung führen können.

Physikalisch / chemische Verfahren

Bei der Oberflächenvorbereitung mit chemischen Verfahren kommen vorwiegend Haftvermittler bzw. Primer zum Einsatz. Haftvermittler sind, wie auch Klebstoffe, chemisch reaktive Substanzen, die eine vermittelnde Schicht zwischen Substratoberfläche und Klebstoff herstellen. Aufgrund ihrer den Klebstoffen verwandten chemischen Eigenschaften muss bei der Anwendung von Haftvermittlern die Einhaltung herstellerseitig angegebener Verarbeitungsbedingungen, wie Offen- und Abbindezeiten, sichergestellt werden. Das Auftragen der Haftvermittler erfolgt im Dünnschichtverfahren ($t < 0,1$ mm), da bei größeren Schichtdicken die Wahrscheinlichkeit für einen Kohäsionsbruch in der haftvermittelnden Schicht unter mechanischer Beanspruchung stark zunimmt (Bach, et al., 2005). Die Verwendung sehr niedrigviskoser Primer stellt hier einen Vorteil dar, da der Primerauftrag mit konstanter Schichtdicke erfolgen soll. Abbildung A.28 zeigt die Anwendung und mögliche Fehlerquellen haftvermittelnder Schichten bei der Oberflächenvorbereitung von Aluminium.

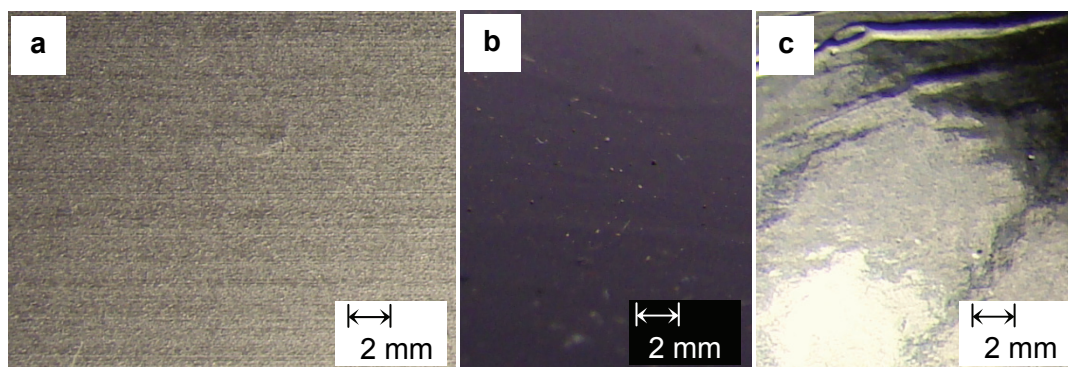


Abbildung A.28: Aluminiumoberfläche; a: gereinigt; b: geprimert; c: fehlerhafter Primerauftrag in zu hoher und wechselnder Schichtdicke

Die Verwendung von Haftvermittlern ist vorteilhaft bei der Herstellung von Klebverbindungen, bei denen der alleinige Einsatz des Klebstoffes nicht die gewünschten Ergebnisse bringt. Die Anwendung von Haftvermittlern kann die Eigenschaften der Klebverbindung verbessern und

die Alterungsbeständigkeit erhöhen. Haftvermittler können weiterhin als Konservierungsmittel für gereinigte Substratoberflächen eingesetzt werden und ermöglichen damit eine industrielle Vorbehandlungsmöglichkeit für viele Ausgangswerkstoffe, die in einem späteren Arbeitsgang dem Klebprozess zugeführt werden. Ein wesentliches Anwendungsbeispiel dafür ist das Auftragen von Haftvermittlern auf Faserwerkstoffe direkt nach dem Herstellungsvorgang dieser Werkstoffe. Dabei werden z. B. Kohlenstofffaserrovings mit einer Silanschichte vorimprägniert. Das daraus entstehende Halbzeug (Prepreg) kann dann in weiteren Herstellungsverfahren zu kohlenstofffaserverstärkten Bauteilen weiterverarbeitet werden (AVK, Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, 2010)

A.5 Charakterisierung unterschiedlicher Faserwerkstoffe

A.5.1 Kohlenstofffasern

Erste Experimente an aus Baumwollgarnen und Bambusfasern hergestellten Kohlenstofffasern werden um 1878 von Edison und Swan durchgeführt, um langzeitbeständige Fasern für Glühlampen zu erzeugen (Schürmann, 2007). Die Entwicklung von hochfesten Kohlenstofffasern begann 1955 in England. Großserienmäßig werden Kohlenstofffasern seit den 70-er Jahren des 20. Jahrhunderts hergestellt. Kohlenstofffasern sind industriell hergestellte Fasern aus kohlenstoffhaltigen Ausgangswerkstoffen. Die Herstellung erfolgt mittels Pyrolyseverfahren. Kohlenstofffasern haben einen Durchmesser von $5 < d < 8 \mu\text{m}$. Der Kohlenstoffanteil beträgt in den Fasern zwischen 90 und 98 %. Je nach Orientierungsgrad der graphitartigen Moleküle werden Kohlenstofffasern in isotrope und anisotrope Typen unterteilt. Isotrope Kohlenstofffasern haben aufgrund ihrer geringen Steifigkeit und Festigkeit nur eine geringe technische Bedeutung. Anisotrope Kohlenstofffasern zeigen eine sehr hohe Festigkeit und Steifigkeit. Die hohe Steifigkeit und Festigkeit der Kohlenstofffasern basiert auf der starken Bindungsenergie der in Schichten angeordneten Graphitkristalle. In Schichtebene der Graphitkristalle lässt sich aus der Bindungsenergie des Graphit-Einkristalls theoretisch ein E-Modul von $E_{II} = 1.050.000 \text{ N/mm}^2$ und eine Festigkeit von $f_u = 100.000 \text{ N/mm}^2$ ableiten. Das Vorhandensein von Strukturdefekten führt zu einer Reduzierung dieser Werte (Schürmann, 2007).

Die hohe Steifigkeit von Kohlenstofffasern ermöglicht die Herstellung von hochsteifen Bauteilen, wie sie in Glasfaserbauweise nicht zu realisieren sind. Je nach Orientierungsgrad und chemischen Aufbau der Fasern werden verschiedene Fasertypen definiert (Schürmann, 2007):

- HT – high-tension, am weitesten verbreiteter Kohlenstofffasertyp,
- UM – intermediate-modulus,
- HM – high-modulus,
- UM – ultra-modulus,
- UHM – ultra-high-modulus,
- UMS – ultra-modulus-strength,
- HMS – high-modulus-strength.

Die Fasern können bei der Herstellung hinsichtlich verschiedener Zielstellungen optimiert werden. Dies erfolgt im Wesentlichen durch den Verkokungsvorgang bei $1.200 \text{ }^\circ\text{C} < T < 3.000 \text{ }^\circ\text{C}$ während der Herstellung. Hohe Temperaturen führen dabei zu einer Erhöhung des E-Moduls. Es ist jedoch nicht möglich, die Fasern gleichzeitig hinsichtlich extrem hoher Steifigkeit und Festigkeit zu optimieren.

Abbildung A.29 zeigt mechanische Materialkennwerte von Kohlenstofffasern in Abhängigkeit verschiedener Herstellungsbedingungen. Mit der Erhöhung des Längsorientierungsgrades der Molekülketten in den Fasern sinken Steifigkeit und Festigkeit der Fasern in Querrichtung ab.

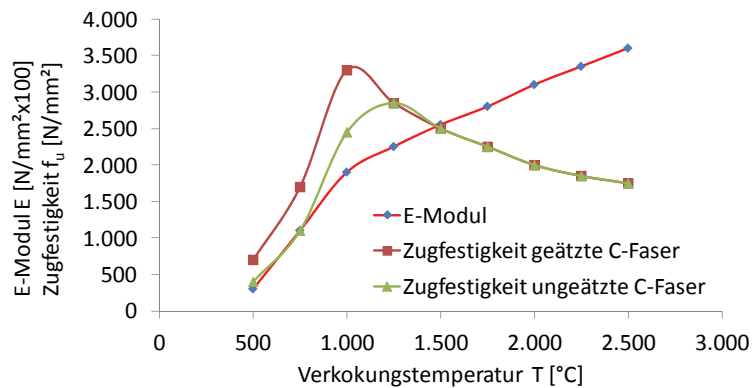


Abbildung A.29: Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit von Kohlenstofffasern als Funktion der Behandlungstemperatur sowie Auswirkung der Oberflächenvorbehandlung nach (Rose, 1977; Degischer, et al., 2009)

Eine Erhöhung der Steifigkeit mit $E > 250.000 \text{ N/mm}^2$ führt zu einem Abfall in der Zugfestigkeit. Eine Optimierung der Fasern hinsichtlich Zugfestigkeit ist mit einem Abfall der Steifigkeit verbunden. Die faserparallele Druckfestigkeit von Kohlenstofffasern bleibt hinter ihrer Zugfestigkeit zurück. Für Strukturen, bei denen die Druckfestigkeit der Kohlenstofffasern eine maßgebende Größe darstellt, muss die Bauteilstruktur speziell in Richtung der Reduzierung auftretender Druckspannungen optimiert werden. Die Dichte von Kohlenstofffasern beträgt $\rho = 1,8 \text{ g/cm}^3$. In Tabelle A-4 sind wesentliche mechanische Kennwerte für technische Kohlenstofffasern zusammengefasst (Schürmann, 2007).

C-Fasertyp	E-Modul [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Bruchdehnung [%]
HT	≈240.000	3.400...4.500	<1,87%
IM	≈300.000	≈5.400	<1,80 %
HM	≈400.000	≈2.350	<0,58%
UM	>560.000	≈3.500	<0,325%
UHM	500.000...900.000	≈2.150	<0,43%
UMS	395.000...600.000	3.000...4.560	<1,15%
HMS	≈400.000	≈4.000	<1,00%

Tabelle A-4: Eigenschaften verschiedener technischer Kohlenstofffasertypen (Schürmann, 2007)

Die geringe Bruchdehnung der Kohlenstofffasern von $\varepsilon_{Cr} < 2 \%$ kann bei der Auslegung von Faserverbundbauteilen zu Problemen führen. Spezielle Herstellungsprozesse ermöglichen die Produktion von bruchdehnungsoptimierten Fasertypen. Als maximal mögliche Bruchdehnung können Werte von $\varepsilon_{Cr} \approx 3 \%$ erzielt werden.

Kohlenstofffasern besitzen in Faserlängsrichtung einen negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Das führt bei einer Temperaturerhöhung zu einer Verkürzung der Faser. Die mechanischen Materialkennwerte von Kohlenstofffasern werden in guter Näherung als temperaturinvariant beschrieben. Die Temperaturbeständigkeit von Kohlenstofffasern ist der Temperaturbeständigkeit anderer Verstärkungsfasern, wie z. B. Glas oder Aramidfasern, deutlich überlegen. Die thermische Stabilität beruht auf der Unschmelzbarkeit des Kohlen-

stoffs bis $T_z = 4.000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Unter nichtoxidierender Atmosphäre bleiben die mechanischen Eigenschaften von Kohlenstofffasern bis $T = 2.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhalten, bei Luftzufuhr verringert sich diese Temperatur auf $T \approx 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Schürmann, 2007). Kohlenstofffasern sind aufgrund freier Elektronen im Molekülverband elektrisch leitfähig. Eine elektrische Leitfähigkeit ist daher bei Bauteilen, die Kohlenstofffasern enthalten, nicht auszuschließen.

Kohlenstofffasern werden in unterschiedlichen Erscheinungsformen angeboten. Gemahlene Fasern mit $L < 70\text{ }\mu\text{m}$ sind ebenso erhältlich wie Endlosrovings, die mit einer Silanschichte zur Verbesserung der Adhäsionsfähigkeit beschichtet sind. Abbildung A.30 zeigt Kohlenstofffaserkurzschnitt-Rovings, die mit einer Schichte auf Wasserbasis beschichtet werden.

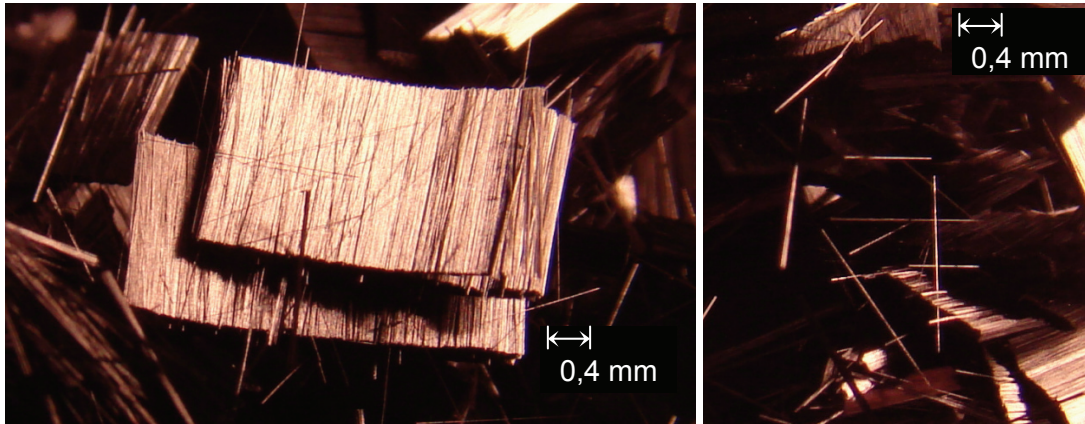


Abbildung A.30: Kohlenstofffaserkurzschnitt- Rovings mit Schichte auf Wasserbasis
L = 2 mm

A.5.2 Glasfasern

Glasfasern bestehen im Wesentlichen aus SiO_2 -Molekülen, die eine amorphe Struktur bilden. Das bedeutet, dass die Moleküle untereinander eine Nahordnung in Form von Tetraedern aufbauen, eine kristalline Fernordnung aber nicht entsteht. Technisch für mechanische Beanspruchung eingesetzte Glasfasern haben i.d.R. einen Durchmesser von $d \approx 20\text{ }\mu\text{m}$. Die mechanischen Eigenschaften von Glasfasern werden vom in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Größeneffekt beeinflusst. Eine gerichtete Anordnung der Moleküle in Längsrichtung ist aufgrund der amorphen Struktur nicht möglich. Der E-Modul in Faserlängsrichtung ist vergleichbar mit dem E-Modul vom kompakten Glas. Die erzielbare Festigkeit hängt vom Durchmesser der Einzelfasern, den neben SiO_2 enthaltenen Oxidbestandteilen und dem umgebenden Medium ab. Abbildung A.31 zeigt unterschiedliche Industrie-Glasfasern, die für Laminierverfahren eingesetzt werden.

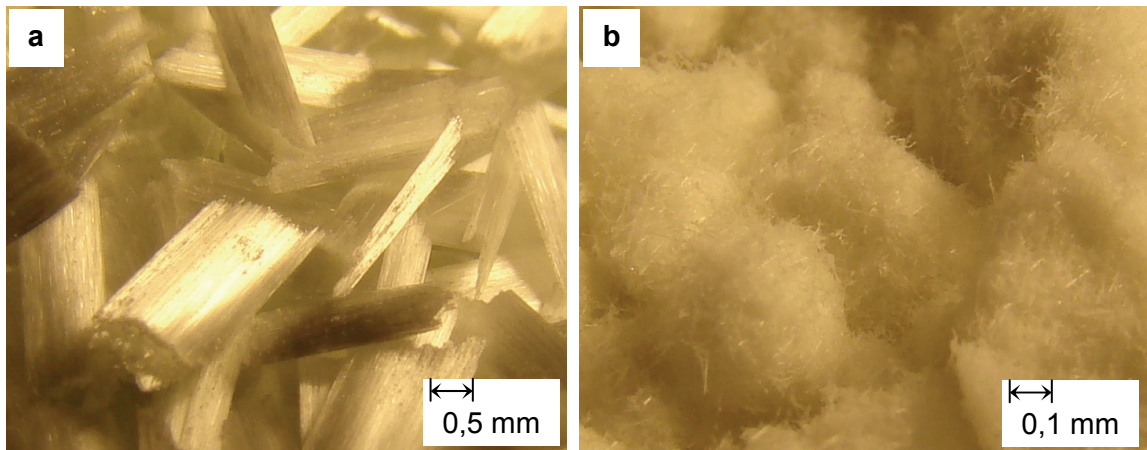


Abbildung A.31: Glasfasern in unterschiedlichen Qualitäten; a: Kurzchnittrovings $L = 3 \text{ mm}$ mit Silanschlichte; b: Einzelfasern ohne Schlichte $L < 0,1 \text{ mm}$

Glasfasern werden aufgrund der verglichen mit Kohlenstofffasern geringen Materialkosten vor allem in der Spritzgussindustrie als Verstärkungselement eingesetzt. Daneben werden Glasfasern verwendet, um glasfaserverstärkte Kunststoff-Bauteile herzustellen. Diese Bauteile erreichen zwar nicht die Steifigkeit und Festigkeit von CFK-Bauteilen, stellen aufgrund des günstigen Preises aber dennoch oft eine interessante Alternative zu ihnen dar.

Aufgrund ihrer optischen Eigenschaften können Glasfasern für die Datenübertragung verwendet werden. Glasfasern aus reinem SiO_2 sind hochtransparent und ermöglichen die optische Signalübertragung über große Strecken, ohne dass eine Verstärkung der Signale über Zwischenstationen erforderlich ist.

Glasfasern haben bei Raumtemperatur einen hohen elektrischen Widerstand von $R > 10^{16} \Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$.

A.5.3 Metallfasern

Metallfasern werden hauptsächlich durch Abtragprozesse von kompakten Metallteilen gewonnen. Es ist eine Vielzahl unterschiedlicher Metallfasern von unterschiedlichen Legierungselementen frei verfügbar. Die Faserlänge variiert zwischen sehr kurz (Fasermehl) und Endlosfasern, die auf Rollen geliefert werden. Abbildung A.32 zeigt kurzgeschnittene Edelstahlfasern, die durch einen Abspanprozess hergestellt werden.



Abbildung A.32: Edelstahlfasern in Kurzschnitt, $L < 5 \text{ mm}$

Ein Hauptanwendungsgebiet für Metallfasern liegt in der Zugkraftbewehrung von Faserbeton. Hier bieten Metallfasern gegenüber anderen Fasertypen den Vorteil der chemischen Beständigkeit im alkalischen Milieu. Des Weiteren sind die Fasern aufgrund der reduzierend wirkenden Umgebung des Betons gegen Korrosion geschützt. Neben den reinen Metallfasern existieren eine Reihe von Metalloxidfasern, z. B. aus Al_2O_3 , die in verschiedenen Spezialgebieten, z. B. beim Bau von Schutzschilden für Satelliten, sowie hochtemperaturbeanspruchte Komponenten, zum Einsatz kommen.

A.5.4 Naturfasern

Naturfasern stellen als nachwachsender Rohstoff eine nachhaltige, interessante und preiswerte Alternative zu technisch hergestellten Kunstfasern dar. Derzeit laufen umfangreiche Untersuchungen mit dem Ziel, Naturfasern für Faser-Kunststoff-Verbundmaterialien nutzbar zu machen. Naturfasern lassen sich grob in drei unterschiedliche Fasergruppen einteilen:

- tierische Fasern auf Eiweißbasis (Haare, Wolle, Seide),
- pflanzliche Fasern auf Zellulosebasis (Flachs, Hanf, Jute, Ramie),
- mineralische Fasern (Asbest).

Bedingt durch die Nachhaltigkeit sind Pflanzenfasern hier von besonderer Bedeutung, da sie in großen Mengen als nachwachsender Rohstoff zur Verfügung stehen. Der erforderliche Energiebedarf zur Herstellung von Naturfasern ist wesentlich geringer als der Energiebedarf für die Herstellung von Kunstfasern, wie z. B. Kohlenstofffasern. Anders als bei vielen technisch hergestellten Fasern treten beim Hautkontakt mit Pflanzenfasern keine Hautreizungen auf. Die Entsorgung von Pflanzenfasern ist i. Allg. unproblematisch, so ist es bei einer geeigneten Matrixauswahl möglich, das Faser-Matrix-System zu kompostieren und damit umweltfreundlich zu entsorgen. Pflanzenfasern haben weiterhin den Vorteil, dass sie eine relativ geringe Dichte $\rho = 1,3 \dots 1,5 \text{ g/cm}^3$ besitzen. Das wird bedingt durch die geometrische Form von Pflanzenfasern, die bedingt durch den Wachstumsprozess hohl sind. Aufgrund dieser geometrischen Form erreichen Pflanzenfasern dichtebezogen sehr gute Steifigkeits- und Festigkeitswerte, die vergleichbar mit Glasfasern sind. Da die volumenbezogenen Steifigkeits- und Festigkeitswerte jedoch im Vergleich zu Kunstfasern, wie z. B. Glasfasern, geringer sind, werden Naturfasern hauptsächlich in Verkleidungsbauteilen und weniger in strukturell tragenden Bauteilen verwendet. Naturfasern werden in der Spritzgussindustrie als Verstärkung von Kunststoffen eingesetzt. Hier werden die Naturfasern mit unterschiedlichen Faserfüllgraden in Prepregs zusammen mit unterschiedlichen thermoplastischen oder duroplastischen Kunststoffen verwendet.

Pflanzenfasern sind in vielen technischen Qualitäten verfügbar. Tabelle A-5 zeigt wesentliche mechanische Eigenschaften von technisch genutzten Pflanzenfasern.

Materialparameter	Flachs	Hanf	Jute	Ramie	Sisal	Baumwolle
E-Modul [N/mm ²]	60.000 ... 80.0000	70.000	10.000 ... 30.000	44.000	38.000	12.000
Zugfestigkeit [N/mm ²]	800 ... 1.500	550 ... 900	400 ... 800	500	600 ... 700	400
Bruchdehnung [%]	1,2 ... 1,6	1,6	1,8	2,0	2,0 ... 3,0	3,0 ... 10,0
relative Feuchte- aufnahme [%]	7	8	12	12 ... 17	11	8 ... 25
Faserdurchmesser [µm]	5-38	10-50	2,4-10	16-125	17-50	12-35
Dichte [g/cm ³]	1,4	1,48	1,46	1,5	1,33	1,51

Tabelle A-5: Eigenschaften verschiedener Naturfasern (Brouwer, 2000)

Aufgrund des natürlichen Wachstumsprozesses weisen Naturfasern eine wesentlich größere Streuung bei den technischen Parametern, wie Faserdurchmesser, Steifigkeit und Festigkeit, auf. Die volumenbezogenen Festigkeiten von Naturfasern liegen generell unterhalb der für technisch hergestellte Fasern üblichen Werte. Bei der Verarbeitung der Fasern dürfen nur relativ geringe Temperaturen vorliegen, da die Faserstruktur bei hohen Temperaturen geschädigt werden kann. Gleiches gilt für den Einsatz unter Gebrauchstauglichkeitsbedingungen, wobei wesentlich geringere Temperaturen als bei Kunstfasern zulässig sind. Dementsprechend ist auch der Brandwiderstand von Naturfasern eher gering. Naturfasern sind i. Allg. hygroskopisch und nehmen im Vergleich zu Kunstfasern relativ viel Wasser auf. Daher muss bei der Verarbeitung von Naturfasern darauf geachtet werden, dass diese zum Zeitpunkt der Verarbeitung ausreichend getrocknet sind, da ansonsten die mechanischen Eigenschaften der Fasern stark abgemindert werden. Naturfasern müssen durch eine Matrix von umgebenden Medien, insbesondere Wasser, isoliert werden, um eine dauerhafte Erhaltung der mechanischen Eigenschaften sicherzustellen. Abbildung A.33 zeigt die Struktur einer Flachsfaser. Innerhalb der Faser ist eine starke Längsorientierung der Faserbestandteile zu beobachten. Die Faser weist eine hohe Porosität auf.

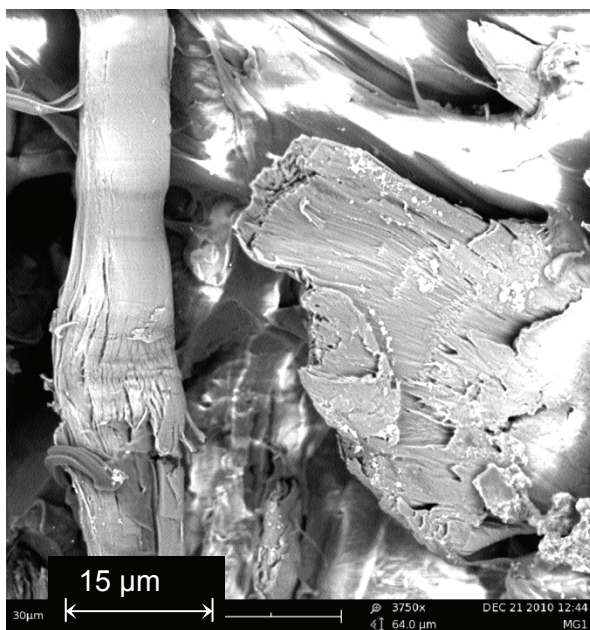


Abbildung A.33: Struktur einer Flachsfaser

A.5.5 Polymere Kunstfasern

Polymere Kunstfasern werden in vielen verschiedenen Varianten hergestellt. Bedeutende polymere Kunstfasern sind:

- Aramidfasern (Kevlar),
- Polyesterfasern,
- Polyethylenfasern.

Die Steifigkeit der polymeren Kunstfasern ist verglichen mit anderen Kunstfasern, wie z. B. der Kohlenstofffaser, geringer, wobei die polymeren Kunstfasern zum Teil sehr hohe Zugfestigkeiten aufweisen. Aufgrund der geringeren Steifigkeit sind die Bruchdehnungen bei polymeren Kunstfasern i. Allg. relativ hoch, was zu einer relativ guten Energieabsorptionsfähigkeit führt. Aramidfasern werden sehr erfolgreich in Panzerungssystemen eingesetzt, wo dieses Energieabsorptionsvermögen benötigt wird. Polyethylenfasern werden verstärkt bei der Herstellung von Seilen verwendet, die zwar nicht die Steifigkeit von Stahlseilen aufweisen, aber dennoch auf vergleichbare Zugfestigkeiten bei einem deutlich verbesserten Handling kommen. Wesentliche Kennwerte für polymere Kunstfasern sind in Tabelle A-6 aufgeführt.

Materialparameter	Aramidfasern	Polyesterfasern	Polyethylen
E-Modul [N/mm ²]	60.000 ... 130.000	4.000 ... 13.000	89.000
Zugfestigkeit [N/mm ²]	2.500 ... 3.500	800 ... 1.300	2.500 ... 3.000
Bruchdehnung [%]	2,0 ... 5,5	10,0 ... 20,0	3,0 ... 4,0
relative Feuchteaufnahme [%]	3,0 ... 7,0	1,0	keine
Faserdurchmesser [µm]	12	10	bis 500
Dichte [g/cm ³]	1,45	1,38 ... 1,4	0,915 ... 0,965

Tabelle A-6: Eigenschaften verschiedener polymerer Kunstfasern (Brouwer, 2000)

A.6 Eigenschaften kunststoffgebundener Faser-Matrix-Systeme

A.6.1 Spritzgussysteme

Unter dem Spritzgießen ist ein Umformverfahren zu verstehen, welches in der Kunststoffverarbeitung eine bedeutende Position eingenommen hat. Beim Spritzgießen unterscheidet man zwischen:

- Thermoplast-Spritzgießen
- Elastomer-Spritzgießen
- Duroplast-Spritzgießen
- Faser-Spritzgießen
- Mehrkomponenten-Spritzgießen
- usw.

Das Spritzgießen mit faserbewehrten Thermoplasten ermöglicht die Herstellung komplexer und hoch beanspruchbarer Bauteile, die in ihrer Formgebung sehr variabel auslegbar sind. Der maximal mögliche Füllgrad der Fasern im Thermoplast ist ebenfalls relativ hoch. Mechanische Untersuchungen an faserbewehrten Polypropylen ergaben sehr hohe Zugfestigkeiten. Das mechanische Zusammenwirken von Fasern und dem Polypropylen wird dabei durch einen Haftvermittler ermöglicht, der vor dem Einbringen der Fasern in die PP-Matrix auf die

Fasern aufgetragen wird. Eine Zusammenstellung experimentell ermittelter Materialeigenschaften von faserbewehrten Polypropylen erfolgt in Tabelle A-7.

Spritzgussystem	E-Modul [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Bruchdehnung [%]
PP ohne Faserverstärkung	1.400	30	>50 %
PP mit Flachsfaser 30 Masse%	4000	40	2,5
PP mit Glasfasern 30 Masse%	6.600	110	2,3
PP mit Glasfasern 40 Masse%	8.300	125	2,0
PP mit Glasfasern 50 Masse%	13.000	140	1,8

Tabelle A-7: Experimentell ermittelte Materialkennwerte verschiedener PP-Spritzguss-systeme

Die Auswertung der ingenieurmäßigen Spannungs-Dehnungsbeziehung unterschiedlicher faserbewehrter PP-Systeme ist in Abbildung A.34 dargestellt. Dabei ist festzustellen, dass die Erhöhung des Füllgrades der Fasern im Faser-Matrix-System zu einer Vergrößerung der Zugfestigkeit führt, bei gleichzeitiger Verringerung der Bruchdehnung.

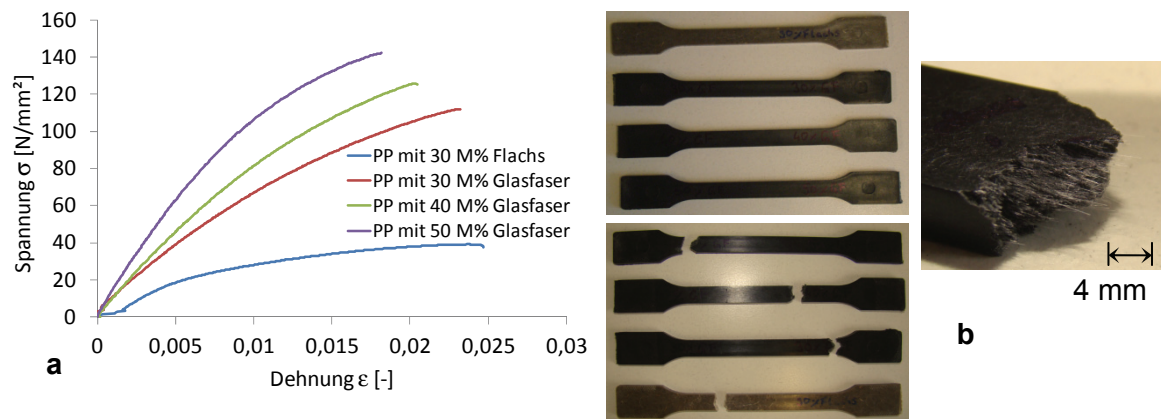


Abbildung A.34: a: Spannungs-Dehnungsbeziehung unterschiedlicher PP-Spritzguss-systeme aus einem Zugversuch; b: Zugstäbe vor und nach dem Zugversuch

Bruchbilder unterschiedlicher Spritzgussproben sind in Abbildung A.35 dargestellt.

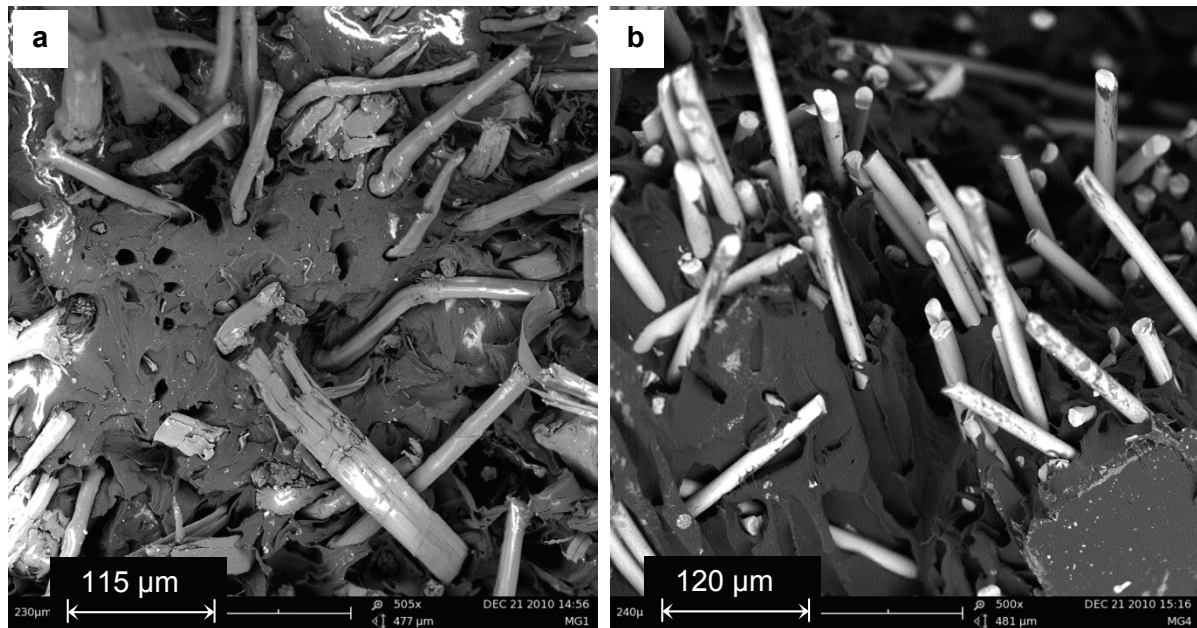


Abbildung A.35: Bruchbilder unterschiedlicher faserverstärkter Polypropylen-Proben nach der Zugbeanspruchung; a: PP mit 30 Masse % Flachsfasern; b: PP mit 40 Masse % Glasfasern

Aufgrund der schlechten Adhäsionseigenschaften von Polypropylen ist die Beschichtung der Fasern mit einer haftvermittelnden Schichte grundlegend erforderlich, um ein leistungsfähiges Faserverbund-System zu erhalten. Abbildung A.36 zeigt Glasfasern aus einem Bruchbild von glasfaserverstärkten Polypropylen, die mit einer haftvermittelnden Schichte überzogen sind.

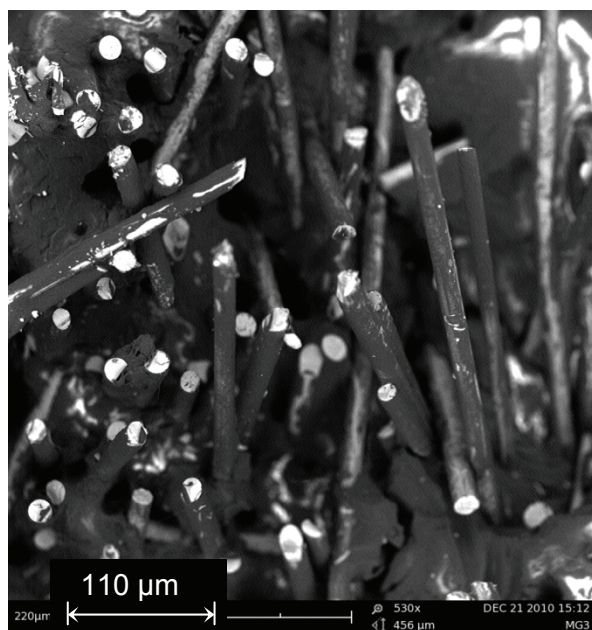


Abbildung A.36: Bruchbild eines glasfaserverstärkten Polypropylen nach Zugbeanspruchung; Schichtenauftrag auf den Glasfasern

Bei der Anwendung von Spritzgussverfahren ist zu beachten, dass durch den Fließvorgang im Spritzwerkzeug eine gerichtete Struktur im Spritzguss entsteht. Faserverstärkte Spritzgussysteme weisen z.T. stark richtungsabhängige Materialeigenschaften in Fließrichtung

und rechtwinklig dazu auf. Abbildung A.37 zeigt unterschiedliche Schliffbilder von glasfaser-verstärkten PP in Fließrichtung und rechtwinklig dazu.

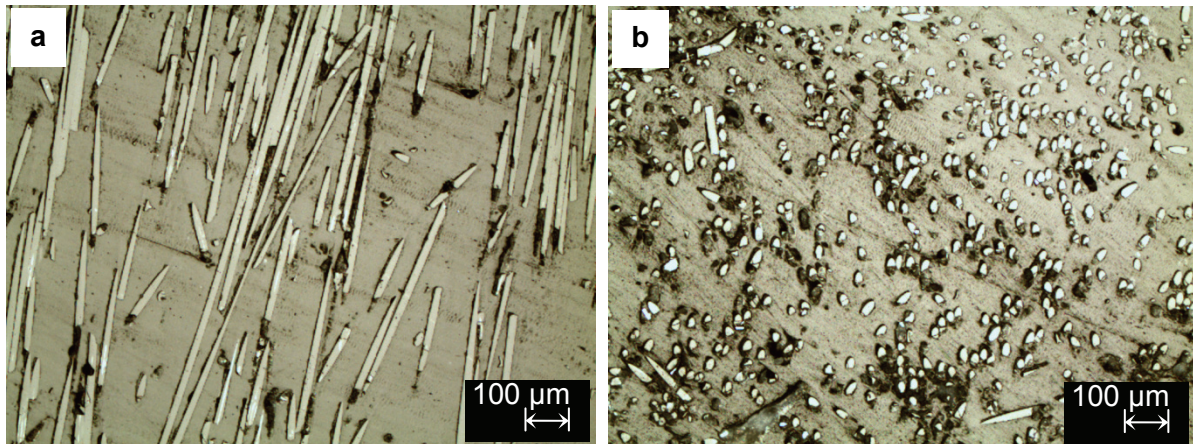


Abbildung A.37: Glasfaserverstärktes Polypropylen als Spritzguss aus Probekörpern von Abbildung A.34; a: Schliffbild in Fließebene des Spritzgusses während der Herstellung; b: Schliffbild rechtwinklig zur Fließebene

Bei dem Design von Spritzwerkzeugen kann dies genutzt werden, indem das Spritzgusswerkzeug so ausgelegt wird, dass die längsgerichtete mechanische Beanspruchung, die das Bauteil während des Gebrauchs erfährt, gleichgerichtet ist mit der Fließrichtung des Spritzgusses während der Herstellung.

Glasfaser-verstärktes Polypropylen als Verbindungsmittel

Glasfaser-verstärktes Polypropylen weist eine sehr hohe innere Festigkeit auf. Die Glasfasern werden für den Einsatz in Polypropylen mit einer speziell auf Polypropylen angepassten Schlichte beschichtet. Das führt zu einer starken Adhäsionsbindung zwischen Glasfasern und der Polypropylenmatrix. Das Hauptproblem bei der Anwendung von glasfaserverstärkten Polypropylen als Verbindungsmittel besteht in der schlechten Adhäsion gegenüber anderen Substratoberflächen in Verbindung mit dem Schrumpfvorgang beim Abkühlen des Spritzgusses nach dem Schuss. Das führt zu einer sofortigen Trennung des glasfaserverstärkten Polypropylens von nahezu allen Substratoberflächen noch während des Abkühlvorgangs. Abbildung A.38 zeigt die Ablösung eines in Spritzgussfertigung hergestellten glasfaserverstärkten Polypropylens von einer Aluminiumoberfläche nach der Abkühlung. Die einzige Möglichkeit zur Anwendung der Spritzgussysteme als Verbindungsmittel besteht in der Anordnung von Hinterschneidungen an den zu verbindenden Oberflächen. Das daraus resultierende Tragsystem entspricht dann jedoch nicht mehr einer flächigen Verbindung, sondern mehr einer punktförmig gestützten Verbindungsform mit starken lokalen Beanspruchungen im Bereich der Hinterschneidung.

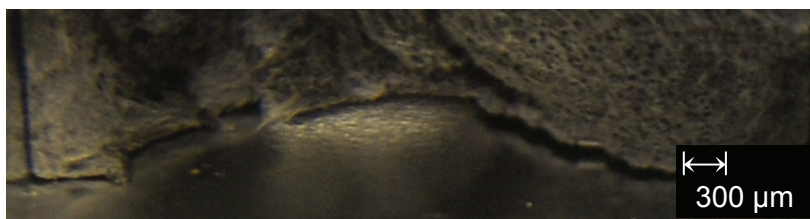


Abbildung A.38: Ablösung von glasfaserverstärkten Polypropylen von einer Aluminium-Substratoberfläche infolge des Abkühlvorgangs

A.6.2 Laminiersysteme / Extrudiersysteme

Das Laminieren und Extrudieren stellen wichtige Produktionsverfahren bei der Herstellung faserverstärkter Kunststoffe dar. Laminier- und Extrudiersysteme werden für die Herstellung vieler faserverstärkter Kunststoffbauteile verwendet, die in ihrer mechanischen Beanspruchbarkeit eine mehr oder weniger ausgeprägte Richtungsabhängigkeit in ihren Materialeigenschaften aufweisen. CFK-Lamellen werden mittels eines Pultrusionsverfahrens hergestellt und besitzen eine unidirektionale Faserausrichtung. CFK- und GFK-Bauteile für den Automobil- und Flugzeugbau werden meist mittels Laminierung hergestellt, wobei hier zwischen dem Laminieren von Fasermatten, also Gelegesystemen mit Keder und Schuss, und dem Laminieren mittels faserverstärkten Spachtelmassen unterschieden wird. Gelegesysteme bieten hierbei den Vorteil, dass durch die Ausrichtung und Verteilung der Fasern in der jeweiligen Matte das mechanische Materialverhalten des späteren Bauteils gezielt beeinflusst werden kann. Bei Spachtellaminierungen sind die mechanischen Eigenschaften weitgehend zweidimensional richtungsunabhängig, wobei die Fasern durch den Vorgang des Aufspachtelns eine definierte Richtungsorientierung erhalten. Dies ist jedoch nur schwer quantifizierbar.

A.6.3 Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)

Glasfaserverstärkter Kunststoff wird in vielen technischen Bereichen eingesetzt. Wesentliche Anwendungsbereiche dazu finden sich in der Automobil- und Flugzeugindustrie, aber auch bei der Herstellung verschiedener Sportgeräte. Vorteile von glasfaserverstärkten Kunststoffsystemen liegen im vergleichsweise geringen Preis der Glasfaser und der großen Bruchdehnung von Glasfasersystemen. Die Steifigkeit der GFK-Systeme ist aufgrund des vergleichsweise geringen E-Moduls von Glas deutlich niedriger als z. B. von CFK-Systemen. Die Festigkeit von GFK-Systemen erreicht je nach Faseranteil und Orientierung sehr gute Werte.

Uniaxiale GFK-Systeme weisen in Faserlängsrichtung sehr gute Festigkeitswerte auf. Die Steifigkeit ist dabei verglichen mit CFK wesentlich niedriger. Das liegt an der Fasersteifigkeit, die bei Glasfasern deutlich geringer als bei Kohlenstofffasern ist. Wesentliche Materialkennwerte von GFK sind:

$$\begin{array}{ll} E_{\parallel} = 30.000 \dots 44.500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} & E_{\perp} = 8.000 \dots 13.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ G_{\perp\parallel} = 5.500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} & G_{\perp\perp} = 5.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ \mu_{\perp\parallel} = 0,15 & \mu_{\perp\perp} = 0,25 \\ \alpha_{T\parallel} = 7 \times 10^{-6} / \text{K} & \alpha_{T\perp} = 27 \times 10^{-6} / \text{K} \end{array}$$

Bei den Festigkeiten muss grundlegend unterschieden werden zwischen der Festigkeit parallel oder senkrecht zur Faserrichtung. Die Festigkeitsunterschiede zwischen Druck- und Zugfestigkeit sind aufgrund günstigerer Stabilitätskriterien der Fasern in der Matrix nicht so stark voneinander abweichend wie z. B. bei CFK. Grundlegende Festigkeiten lauten:

Axialfestigkeiten:

$$f_{u\parallel}^{\oplus} = 800 \dots 1.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{u\parallel}^{-} = 500 \dots 900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{u\perp}^{\oplus} = 50 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{u\perp}^{-} = 90 \dots 120 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} ,$$

Schubfestigkeit:

$$\tau_{u\perp\parallel} = 50 \dots 70 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} .$$

Bei unidirektional gerichteten GFK-Stäben oder Lamellen sind unterschiedliche Faserfüllgrade erzielbar. Abbildung A.39 zeigt das Schliffbild eines GFK-Stabs mit unidirektionaler Faserorientierung. Der geringe Füllgrad und die unregelmäßige Faserverteilung im Querschnitt führen hier zu einer reduzierten Druckfestigkeit.

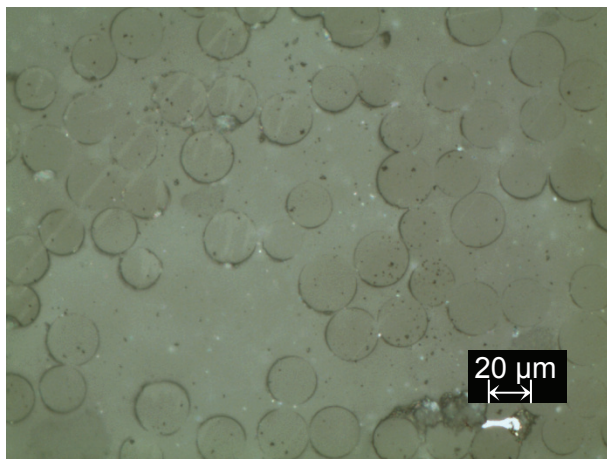


Abbildung A.39: Schliffbild eines GFK-Stabs mit unidirektionaler Faserorientierung

A.6.4 Kohlenstofffaser-verstärkter Kunststoff (CFK)

Kohlenstofffaser-verstärkter Kunststoff (CFK) stellt einen sehr leistungsfähigen Werkstoff dar, der herausragende Eigenschaften hinsichtlich Steifigkeit und Festigkeit bietet. Es ist eine Vielzahl unterschiedlicher CFK-Systeme auf dem Markt verfügbar, welche sich grundsätzlich in einaxiale und mehraxiale Systeme unterteilen lassen. Unter mehraxialen CFK-Systemen versteht man i. Allg. CFK-Matten oder Gelegesysteme. Diese werden zunehmend im Automobil- und Flugzeugbau eingesetzt, wo eine mehrachsige Beanspruchung im Bauteil vorliegt. Die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften sind verglichen mit einaxialen Systemen geringer, da die Fasern nur in der jeweiligen Faserlängsrichtung Verstärkungseffekte erzeugen.

Im Bauwesen wird daher stets versucht, einaxiale Beanspruchungszustände zu erzeugen, um die recht kostenintensive CFK-Verstärkung optimal nutzen zu können. Für einaxiale Verstärkungssysteme werden spezielle CFK-Lamellen entwickelt, die in einer Vielzahl unterschiedlicher Querschnitte und verschiedener Faser-Matrix-Systeme erhältlich sind. Wesentliche Kenngrößen von CFK-Lamellen sind:

- Querschnittsabmessungen,
- verwendete Kohlenstofffasern,
- Packdichte der Kohlenstofffasern,

- verwendetes Matrix-System, meist werden einkomponentige Epoxidharzsysteme, seltener werden zweikomponentige Epoxidharzsysteme verwendet,
- Anordnung der Fasern in der Matrix
- Faservorspannung,
- Tempern der CFK-Lamellen.

CFK-Lamellen übertragen im Wesentlichen nur Kräfte parallel zur Faserrichtung. Die Materialkennwerte weisen große Unterschiede in Abhängigkeit des Winkels zwischen Beanspruchungsrichtung und Faserrichtung auf. Wesentliche Materialkennwerte sind:

$$\begin{aligned}
 E_{\parallel} &= 120.000 \dots 300.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} & E_{\perp} &= 10.000 \dots 20.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\
 G_{\parallel} &= 5.800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} & G_{\perp} &= 5.400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\
 \mu_{\parallel} &= 0,12 & \mu_{\perp} &= 0,3 \\
 \alpha_{T\parallel} &= 0,2 \times 10^{-6} / \text{K} & \alpha_{T\perp} &= 30 \times 10^{-6} / \text{K}
 \end{aligned}$$

Bei den Festigkeiten muss grundlegend unterschieden werden zwischen Druck- und Zugfestigkeit und Festigkeit parallel oder senkrecht zur Faserrichtung. Grundlegende Festigkeiten lauten:

Axialfestigkeiten:

$$\begin{aligned}
 f_{u\parallel}^{\oplus} &= 1.500 \dots 2.850 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} & f_{u\parallel}^{-} &= 450 \dots 1.500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\
 f_{u\perp}^{\oplus} &= 70 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} & f_{u\perp}^{-} &= 200 \dots 300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}
 \end{aligned}$$

Schubfestigkeit:

$$\tau_{u\perp\parallel} = 80 \dots 100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung ist hauptsächlich abhängig von der verwendeten Faserart und der Packdichte der Fasern. Bei der erzielbaren Druckfestigkeit spielen zusätzlich das verwendete Matrix-System, die Vorspannung der Fasern und vorhandene Imperfektionen eine entscheidende Rolle. Das Versagen unter Druckbeanspruchung wird initiiert durch ein Stabilitätsversagen der Fasern in der Matrix. Die theoretisch erreichbare Druckfestigkeit der Kohlenstofffasern kann nicht annähernd erreicht werden (Schürmann, 2007).

A.7 Spezielle Betrachtungen zur Anwendung von KfV im Fassadenbau

Konstruktive Aspekte, insbesondere die Verarbeitbarkeit und Aushärtedauer des KfV spielen eine entscheidende Rolle bei der industriellen Anwendung. Daher werden die unterschiedlichen KfV-Systeme hinsichtlich der Verarbeitbarkeit optimiert und die Aushärtedauer des KfV auf ein Minimum reduziert, um kurze Taktzeiten in der industriellen Anwendung zu ermöglichen.

Im Mittelpunkt der Untersuchung stehen Fragestellungen des Klebe-Fügens von Tragkonstruktionen für Glasscheiben, wie Fenster- und Türrahmen aus Metall, in erster Linie Aluminium, unter Vermeidung aufwändiger zusätzlicher Verbindungselemente in den Rahmenecken.

Die Halterung von Glaselementen für Fenster, Türen u. Ä. erfolgt gegenwärtig im Wesentlichen durch das Befestigen dieser Elemente an bzw. in Konstruktionen aus Aluminium-, Stahl- oder Kunststoffprofilen. Dabei stehen die hochwertigen Konstruktionsformen aus Aluminium im Wettbewerb mit qualitativ einfachen Tragkonstruktionen aus Kunststoffen. Während die Kunststoffprofile sehr einfach in den Rahmenecken verschweißt werden können, müssen Aluminiumprofile sehr aufwändig unter Zuhilfenahme zusätzlicher Verbindungselemente mechanisch verpresst und anschließend aus Dichtigkeitsgründen verklebt werden. Dieser Arbeitsprozess ist bisher nicht automatisierbar. Damit besitzen die sehr hochwertigen Metallkonstruktionen einen wesentlichen ökonomischen Wettbewerbsnachteil. Abbildung A.40 zeigt die Bestandteile einer Fensterflügleckverbindung in Aluminiumbauweise.

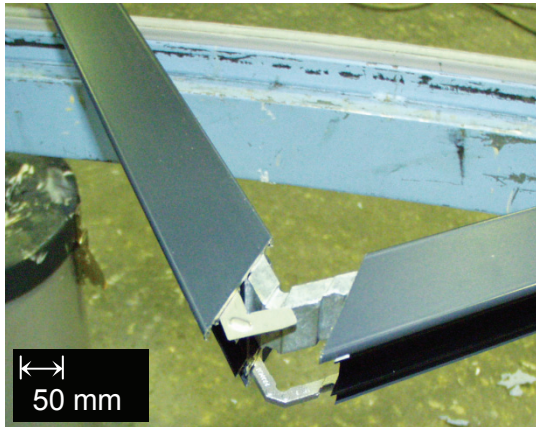


Abbildung A.40: Fügen von Aluminiumprofilen im Fensterbau \Rightarrow Aufwändiger Einsatz von Eck- und inneren Gehrungswinkeln

Die Zielstellung besteht in der Entwicklung von form- und stoffschlüssigen Verbindungen auf der Basis von KfV, die es ermöglichen, Rahmen aus Metall in einem Arbeitsgang zu fügen.

Dabei sollen in die Hohlprofile der Rahmen KfV im zähflüssigen Zustand injiziert werden. Nach deren Aushärtung wird damit eine dauerhafte Verbindung realisiert. Dies erfordert die Adaption vorhandener Klebstoffe, die sowohl in Zusammenarbeit mit hochtragfähigen Fasern aus Kohlenstoff, Glas, Kunststoff oder Stahl einen Verbundwerkstoff als auch eine hochwertige Verbindung der Metallprofile bilden.

A.7.1 Ausbildung herkömmlicher Systeme

Bei herkömmlichen Fassadenelementen werden die Aluminiumhohlprofile mittels spezieller Verbindungsmittel hergestellt. Mechanische Beanspruchungen werden über eine Nagel- oder Quetschverbindung von einem Fassadenelement in den Eckverbinder eingeleitet, über die Ecke im Eckverbinder umgeleitet und wiederum über eine Nagel- oder Quetschverbindung aus den Eckverbinder hinaus in das andere Fassadenelement weitergeleitet. Das System eines herkömmlichen Eckverbinders für Aluminium-Fassadenelemente ist in Abbildung A.41 dargestellt. Die Eckverbindungselemente werden i.d.R. aus Aluminiumdruckguss gefertigt. Das mechanische Ansprechverhalten der Eckverbindungselemente ist relativ träge, da die Kraft einen relativ weiten Weg innerhalb der Eckverbindung zurücklegen muss. Die daraus entstehenden Dehnungen führen dazu, dass in der Eckverbindung ein mechanisches Spiel systembedingt vorliegt.

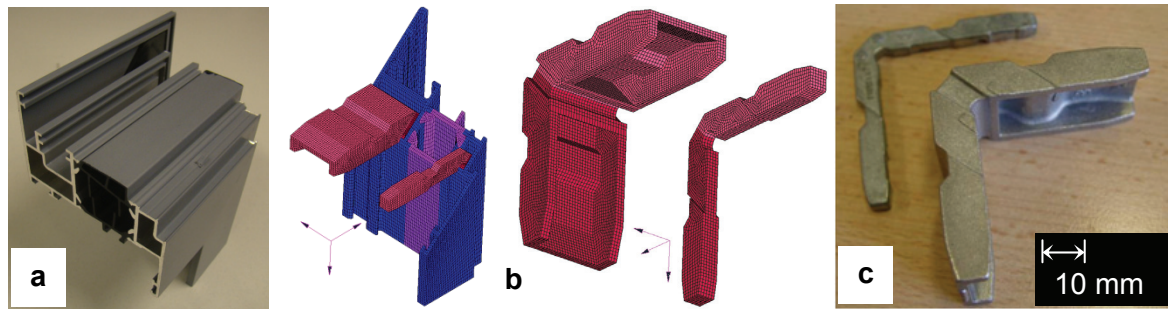


Abbildung A.41: Herkömmliches Verbindungssystem für Aluminium-Fassadenelemente
a: Fensterflügel im Eckbereich mit innenliegenden Eckverbinder; b: Modell eines Eckverbindungselementes für FEM-Berechnungen; c: Eckverbinder für ein spezifisches Fassadensystem

Der wesentliche Nachteil dieses Eckverbindersystems besteht in der nicht möglichen Automatisierbarkeit und den systemgebundenen Verbindungsmitteln.

In der Eckverbindung eines Fassadenelementes treten mechanische Beanspruchungen vor und während des Einbaus der Elemente in eine Fassade auf. Diese Beanspruchungssituation ist geprägt von einer hohen Momentbeanspruchung bei geringer Querkraft. Meist werden die Glaselemente nach dem Einbau in das Fassadenelement eingeklotzt. Der Beanspruchungszustand wechselt daraufhin in eine große Querkraft bei einem geringen Moment. Im Eckverbindungselement führt das zu hohen Zugspannungen und Schubbeanspruchungen.

A.7.2 Einfache Verbindungsformen

In experimentellen Untersuchungen wird die Momenten Tragfähigkeit sowie Querkrafttragfähigkeit einer Aluminiumhohlprofilverbindung untersucht. Das erlaubt die grundlegende Klassifizierung der Verbindungsvarianten hinsichtlich der Tragfähigkeit sowie des Bruchverhaltens. Numerische Berechnungen, wie in Abbildung A.45 dargestellt, ermöglichen hierbei, einen Einblick in das mechanische System der Eckverbindung unter verschiedenartigen Beanspruchungen zu erhalten.

Die Eckverbindung wird für alle Systeme einheitlich hergestellt und experimentell untersucht:

- Quadratrohr QR 25x2,5 Aluminium EN AW-6005A T4 anodisiert,
- Einfüllhöhe des Klebstoffs / KfV: $L = 30 \text{ mm}$,
- Einspannung an einem Quadratrohr,
- Aufbringen einer Belastung als Einzellast mit einem Hebelarm von $b = 100 \text{ mm}$.

Abbildung A.42 zeigt die experimentelle Durchführung des Belastungsversuchs an einer Aluminium-Hohlprofil-Rahmenecke.

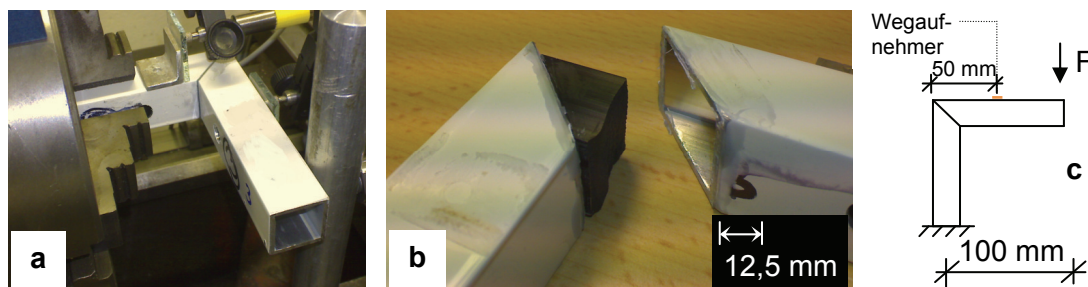


Abbildung A.42: Experimentelle Untersuchung einer KfV-gefügten Rahmenecke hinsichtlich der mechanischen Beanspruchbarkeit; a: Versuchsdurchführung; b: Bruch nach mechanischer Beanspruchung (KfV-A); c: Belastungsmodell

Basierend auf diesen Eckversuchen kann eine vergleichende Betrachtung zwischen den einzelnen nicht faserverstärkten und faserverstärkten Systemen durchgeführt werden. Abbildung A.43 zeigt die unterschiedlichen Last-Verformungsverläufe für die untersuchten KfV-Systeme bzw. verschiedenen Klebstoffe. Dabei kann ein differenziertes Last-Verformungsbild mit unterschiedlichen Versagensarten erstellt werden.

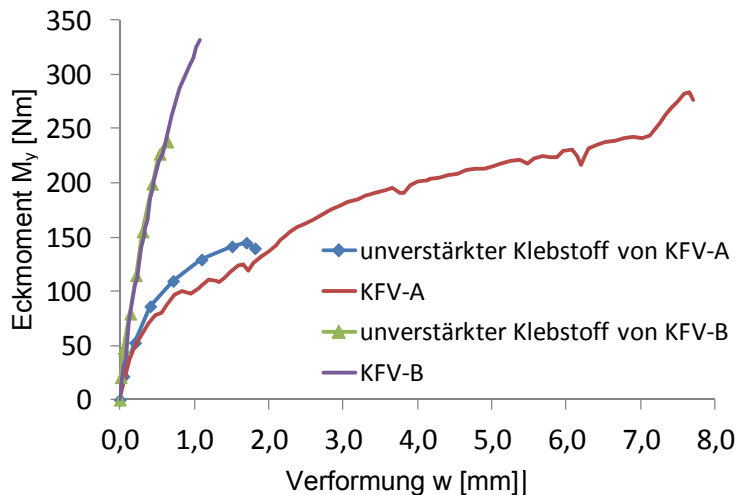


Abbildung A.43: Vergleich unterschiedlicher Klebstoff- und KfV-Systeme hinsichtlich der Tragfähigkeit einer Aluminiumhohlprofileckverbindung

Unterschiedliche Bruchformen der untersuchten Verbindungsvarianten sind in Abbildung A.44 dargestellt. Die Eckverbindung aus KfV-B bzw. dem SiO_2 -gefüllten nicht faserverstärkten Klebstoff für KfV-B ist generell steifer als die Variante KfV-A. Das Versagen erfolgt hier schlagartig, der Bruch wird eingeleitet durch einen Riss im Bereich der Gehrungsschnittfläche. Die Bruchfläche des faserverstärkten KfV-B hat ihren Initialriss ebenfalls im Bereich des Gehrungsschnitts. Die Bruchfläche weist dabei starke Zerklüftungen auf, der Riss pflanzt sich immer zwischen den Kohlenstofffasern fort. Die Bruchfläche ist somit wesentlich größer als bei der nicht faserverstärkten Variante. Beim nicht faserverstärkten Klebstoff ist die Bruchfläche glatt in der Ebene des Gehrungsschnitts gelegen. Die Eckverbindung aus KfV-A bzw. dessen unverstärkten Klebstoffs weist ein weiches Last-Verformungs-Verhalten, aber auch duktiles Versagensmuster auf. Der unverstärkte Klebstoff für KfV-A zeigt ein schlagartiges Versagen. Der faserverstärkte KfV-A weist ein zweistufiges Versagensbild auf. Der Initialriss erfolgt wiederum an der Gehrungsfläche, jedoch pflanzt sich dieser Riss nicht in den KfV fort, sondern führt zu einer Ablösung des KfV an der Aluminiumhohlprofilinnenwandung. Die Last kann dabei weiter gesteigert werden, bis schließlich die innere Festigkeit des KfV-A überschritten wird und ein Bruch im KfV-A erfolgt. Die Bruchfläche ist auch hier stark zerklüftet, aufgrund der sehr kurzen Fasern sind die Zerklüftungen dabei aber mikroskopisch klein.

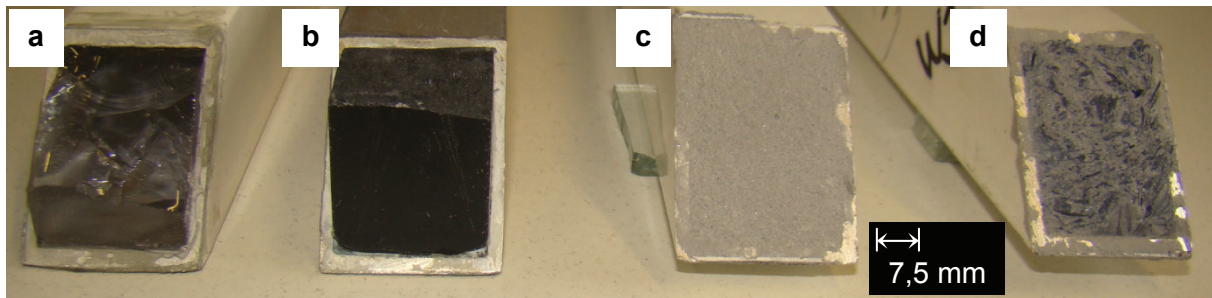


Abbildung A.44: Unterschiedliche Bruchformen unverstärkter und faserverstärkter KfV nach Biegebeanspruchung; a: unverstärkter Klebstoff für KfV-A; b: KfV-A; c: SiO₂-gefüllter nicht faserverstärkter KfV-B; d: KfV-B

Numerische Betrachtung einfacher Verbindungsformen

Bei der mechanischen Betrachtung einfacher Rahmeneckverbindungen aus Hohlprofilen, die mit KfV hergestellt werden, gibt es zwei grundlegende Betrachtungsweisen:

- Hohlprofile im Eckbereich mit KfV-gefüllter Verbundfuge, Hohlprofil zu KfV intakt,
- Hohlprofile im Eckbereich mit KfV-gefüllter Verbundfuge, Hohlprofil zu KfV einseitig gerissen.

Die daraus resultierenden Beanspruchungen auf den KfV unterscheiden sich stark voneinander. Ergebnisse numerischer Analysen des Eckwinkelversuchs sind in Abbildung A.45 dargestellt.

Wesentliche Ausgangsparameter für die unterschiedlichen Analysen sind:

- Biegeversuch an einem geklebten Eckwinkel, rechtwinklige Verbindung,
- Hebelarm $L = 500 \text{ mm}$; angreifende Kraft $F = 500 \text{ N}$,
- Hohlprofil QR 25 x 2 mm; $E = 70.000 \text{ N/mm}^2$,
- Füllkörper $L = 40 \text{ mm}$; $E = 12.000 \text{ N/mm}^2$.

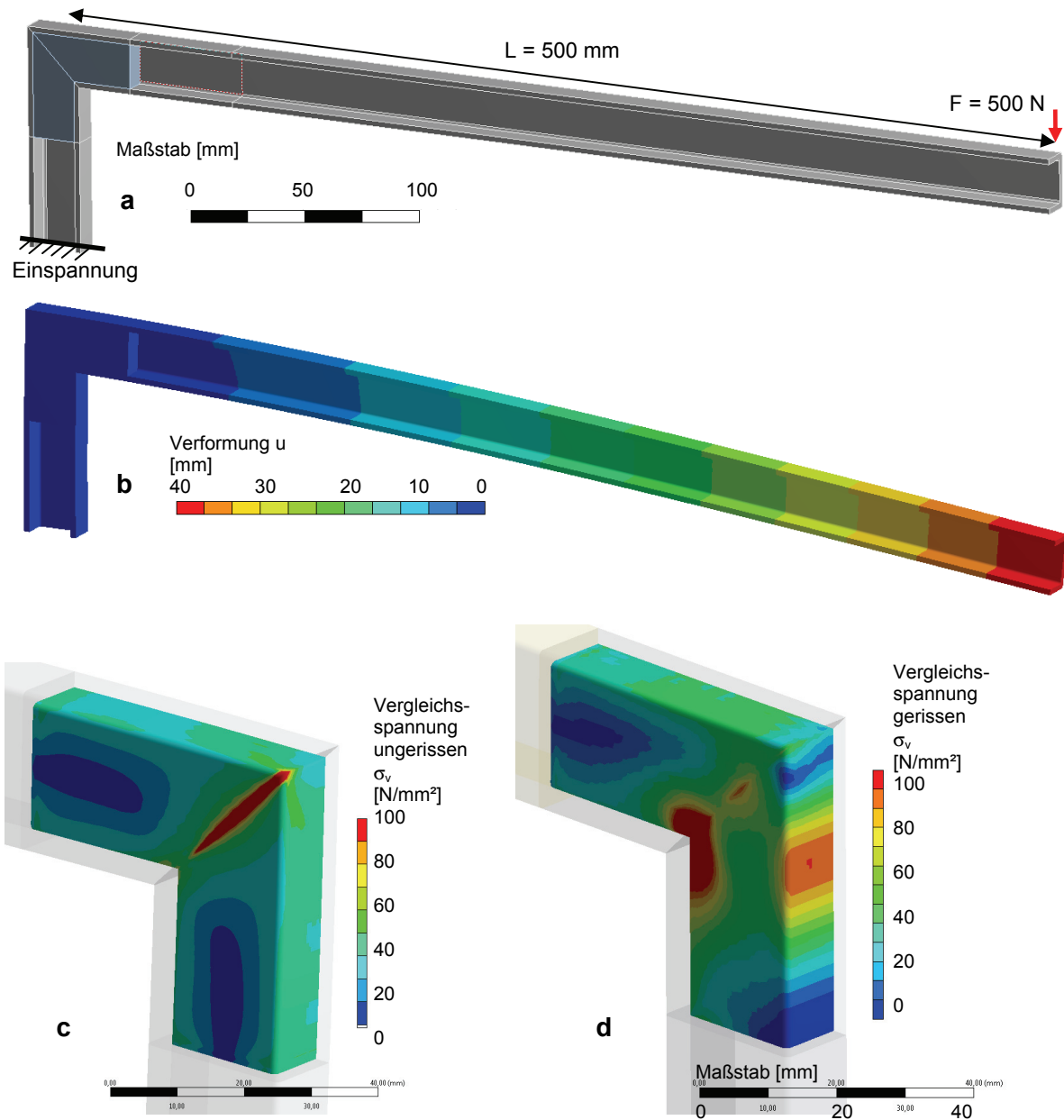


Abbildung A.45: Ergebnisse der FEM-Analyse eines Eckversuchs; a: Belastungsmodell b: Verformungen des Versuchskörpers [mm]; c: Vergleichsspannungen innerhalb des KfV [N/mm²] ungerissen; d: Vergleichsspannungen innerhalb des KfV [N/mm²] im gerissenen Zustand der Verbundfuge KfV zu Hohlprofilinnenwandung

Im Ergebnis der numerischen Betrachtung der Eckwinkelversuche unter Momentbeanspruchung ist ein signifikanter Unterschied zwischen dem mechanischen System eines KfV-Verbindungselementes im ungerissenen Zustand und dem mechanischen System nach Versagen der Adhäsionsfuge zwischen Hohlprofilinnenwandung und KfV zu erkennen. Die Beanspruchungen innerhalb des KfV lagern sich nach dem Anriss der Adhäsionsfuge stark um. Dennoch behält das System auch nach dem Anriss der Verbundfuge eine Resttragfähigkeit, die erst mit Überschreitung der Festigkeit im KfV aufgebraucht wird. Das hier beschriebene Nachbruchverhalten ist auch in den im Abschnitt 3.2 dargestellten experimentellen Untersuchungen nachweisbar.

A.7.3 Komplexe Verbindungsformen

Zur Untersuchung hinsichtlich der Eignung von KfV als Verbindungsmittel von Aluminium-Fensterflügeln werden umfangreiche Belastungsversuche an Fensterflügelprofilen zweier marktführender Fassadenproduzenten durchgeführt. Dabei werden bestehende Verbindungssysteme mit den KfV-Systemen gegenübergestellt und zum Vergleich auch ein Spritzgussystem herangezogen.

Der Standardversuch zur Ermittlung des Last-Verformungs-Verhaltens einer Fensterflügel-ecke bestand in einer zerstörenden Prüfung eines in Abbildung A.46a dargestellten Eckwinkels mit der Schenkellänge $L = 550$ mm. Mit dieser Versuchskonfiguration werden alle in die engere Auswahl gekommenen KfV-Werkstoffe auf ihre Eignung als Fügmaterial geprüft. Als Referenz werden zusätzlich Versuche an Aluminium-Eckwinkeln herkömmlicher Bauart durchgeführt. In Abbildung A.46 ist eine Übersicht wesentlicher Versuchsergebnisse an Fensterflügelecken zusammengestellt.

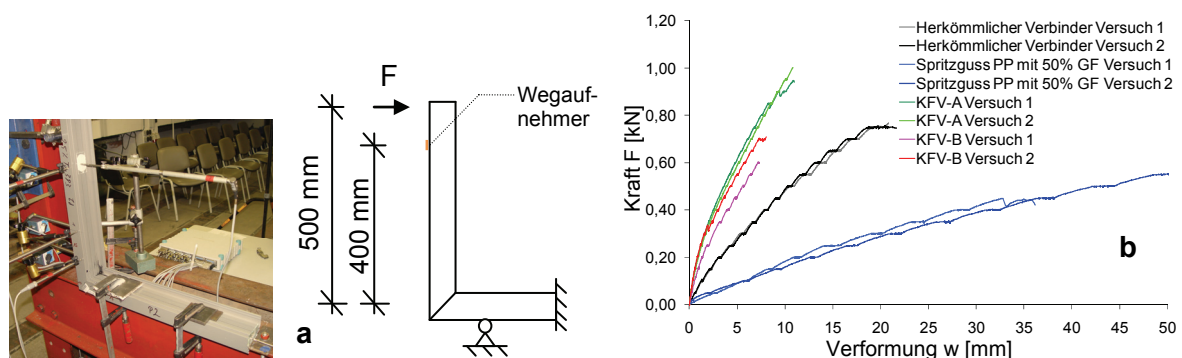


Abbildung A.46: Versuchsdurchführung der Eckwinkelprüfungen; a: Durchführung des Versuchs und Belastungsmodell; b: Kraft-Weg-Diagramme für unterschiedliche Verbindungsvarianten

Die in den Versuchen ermittelten, in Abbildung A.47 dargestellten, Bruchbilder und Versagensformen stimmen im Wesentlichen mit den Ergebnissen der Untersuchungen an einfachen Aluminiumhohlprofilverbindungen überein. Eine weitere Erkenntnis aus den Versuchen sowie aus numerischen Analysen ist die direkte Lastweiterleitung im Eckverbindungs-bereich durch den KfV. Durch das gute Adhäsionsvermögen des Klebstoffs gegenüber der Profilinnenwandung werden die Kräfte, verglichen mit der herkömmlichen Verbindungsvariante, über sehr kurze Wege abgetragen. Ein weiterer Effekt der direkten Lastweiterleitung ist die geringe erforderliche Einbindetiefe des KfV in den Profilquerschnitt. In Bereichen, die weiter von der Verbindungsstelle entfernt liegen als die zweifache KfV-Querschnittsbreite, ist die Kraftübertragung vom KfV zum Aluminiumprofil abgeschlossen. Dadurch ergibt sich ein geringes erforderliches KfV-Volumen, was eine Grundlage für die Wirtschaftlichkeit der neu entwickelten Verbindungstechnologie darstellt. Bei der mit dem Spritzguss hergestellten Verbindung fehlt die direkte Ankopplung zwischen dem Spritzguss und der Innenwandung des Profils. Der Kunststoff wird bei mechanischer Beanspruchung aus dem Hohlprofil herausgezogen. Das erklärt die geringe Steifigkeit und Festigkeit der Verbindung.

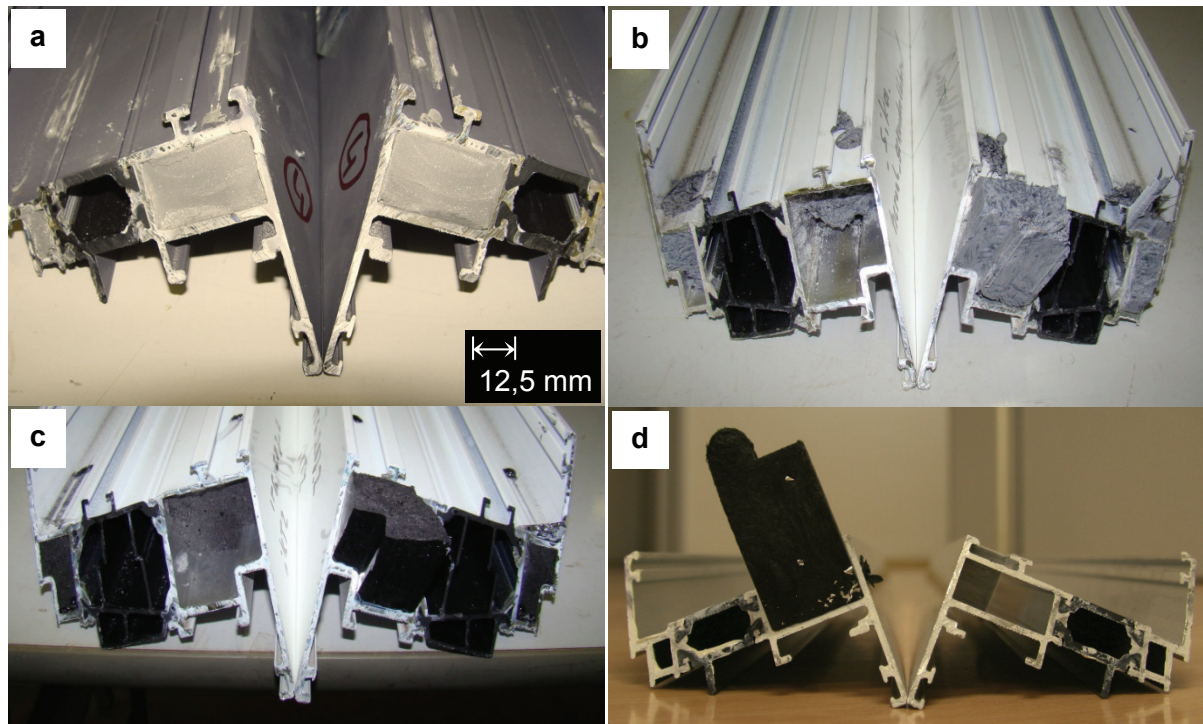


Abbildung A.47: Bruchbilder von zerstörend geprüften Fensterflüglecken; a: SiO₂-gefüllter Klebstoff für KfV-B; b: KfV-B; c: KfV-A; d: glasfaserverstärktes PP als Spritzguss,

Zur Untersuchung der Auswirkungen aus Klimawechselbeanspruchung werden umfangreiche Vergleichsuntersuchungen vor und nach der Klimabeanspruchung durchgeführt. Die Temperaturwechselbeanspruchung wird in einer Klimakammer durchgeführt. Der Temperaturwechselbereich lag zwischen +80 °C maximal und -20 °C minimal. Die Periodendauer für einen Temperaturwechsel betrug 120 min. Als Temperaturwechselbelastung erfolgten insgesamt 100 Periodendurchgänge. Anschließend werden die Fensterflügel-Eckwinkel nach der in Abbildung A.46 dargestellten Versuchskonfiguration zerstörend geprüft. Die Auswertung ergab für den KfV-B eine geringfügige Steigerung der Grenzbelastbarkeit, für den KfV-A eine Abminderung der Grenzbelastbarkeit nach dem Temperaturwechseltest. Diese Versuchsergebnisse stehen damit im Zusammenhang mit den in Abschnitt 3.2.4 beschriebenen Auswirkungen der Temperatur auf die innere Festigkeit der KfV. Beide Varianten liegen in ihrer Gebrauchstauglichkeit deutlich oberhalb der Gebrauchstauglichkeit der herkömmlich hergestellten Fensterflügelprofil-Verbindung. Abbildung A.48 zeigt das Last-Verformungsverhalten von Fensterflüglecken mit unterschiedlicher Eckwinkelausbildung.

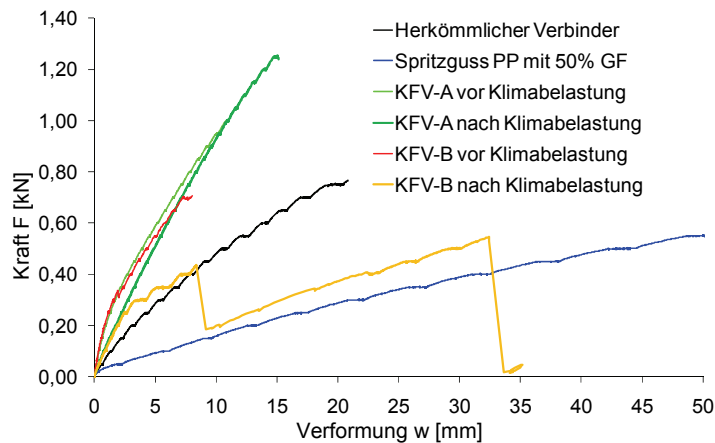


Abbildung A.48: Last-Verformungs-Verhalten von unterschiedlich gefertigten und klimatisch beanspruchten Fensterflüglecken heroal Profil 110E Flügel 56 mm RN

Numerische Betrachtung komplexer Verbindungsformen

Die Verbindung komplexer Profilformen, wie sie im Fassadenbau üblich sind, führt grundsätzlich zu keinen grundlegend abweichenden Beanspruchungszuständen im KfV verglichen mit einfachen Verbindungsformen. Das Grundsystem der zu verbindenden Hohlprofile mit einer auf Gehrung geschnittenen Rahmenecke bleibt bestehen. Abweichend dazu unterscheidet sich das Profil im Außenbereich durch vielfältige Möglichkeiten der Anordnung auskragender Aluminiumstege, die zu Verblendungseffekten eingesetzt werden. Die numerischen Untersuchungen werden beispielhaft für eine biegebeanspruchte Rahmenecke am Fassadenprofil Schüco Royal S65 geführt.

Wesentliche Grundlagen für die numerische Modellierung sind:

- Fensterflüglecke SCHÜCO Royal S65,
- herkömmliche Verbindungsvariante,
- KfV-B als Eckverbinder,
- KfV-A als Eckverbinder,
- Rahmenecke einseitig eingespannt,
- Vertikalkraft im Rahmenebene $F = 500 \text{ N}$ mit Hebelarm $L = 500 \text{ mm}$.

Abbildung A.49 zeigt Ergebnisse numerischer Analysen von Eckverbindungen, die in herkömmlicher Systembauweise gefügt sind, und Eckverbindungen, die mit KfV gefertigt sind. Analog zu den experimentellen Untersuchungen ist die Steifigkeit einer KfV-gefügten Eckverbindung wesentlich höher als die Steifigkeit einer herkömmlich gefertigten Eckverbindungsvariante. Das ist in sehr kurzen Lastwegen begründet, die Kräfte innerhalb der Eckverbindung zurücklegen müssen. Die mechanische Ankopplung erfolgt somit sehr direkt. Die numerisch berechneten Vergleichsspannungen im Bereich der Eckverbindung sind für die unterschiedlichen Systeme in Abbildung A.50 dargestellt. Es wird deutlich, dass im KfV-gefügten System Bereiche, in denen konzentriert Spannungen auftreten, wesentlich kleiner sind, als das in den herkömmlichen Verbindungselementen der Fall ist. Auf die Spannungsbildung im ungestörten Profilbereich hat das jedoch keinen Einfluss. Die Spannungen im Eckverbindungselement sind ebenfalls bei der KfV-Variante vergleichsweise niedrig, jedoch muss hier beachtet werden, dass die Beanspruchbarkeit des KfV unterhalb der Beanspruchbarkeit des Aluminiums liegt. Einen Vergleich des Last-Verformungs-Verhaltens für unterschiedliche Eckverbindungssysteme erfolgt in Abbildung A.51. Hier bestehen in Analogie zu den in Abbildung A.49 und Abbildung A.50 gezeigten qualitativen Unterschieden zwischen herkömmlichem Eckverbinder-System und KfV-gefügtem System wesentliche Unterschiede im Last-Verformungs-Verhalten. Die Differenz zwischen den einzelnen KfV-

Systemen KfV-A und KfV-B ist jedoch, bedingt durch die gleichartige Ankopplung in der Rahmenecke, relativ gering. Der Unterschied in der Steifigkeit der verschiedenen Systeme hat somit nur einen geringen Einfluss auf das globale Last-Verformungs-Verhalten der Eckverbindung.

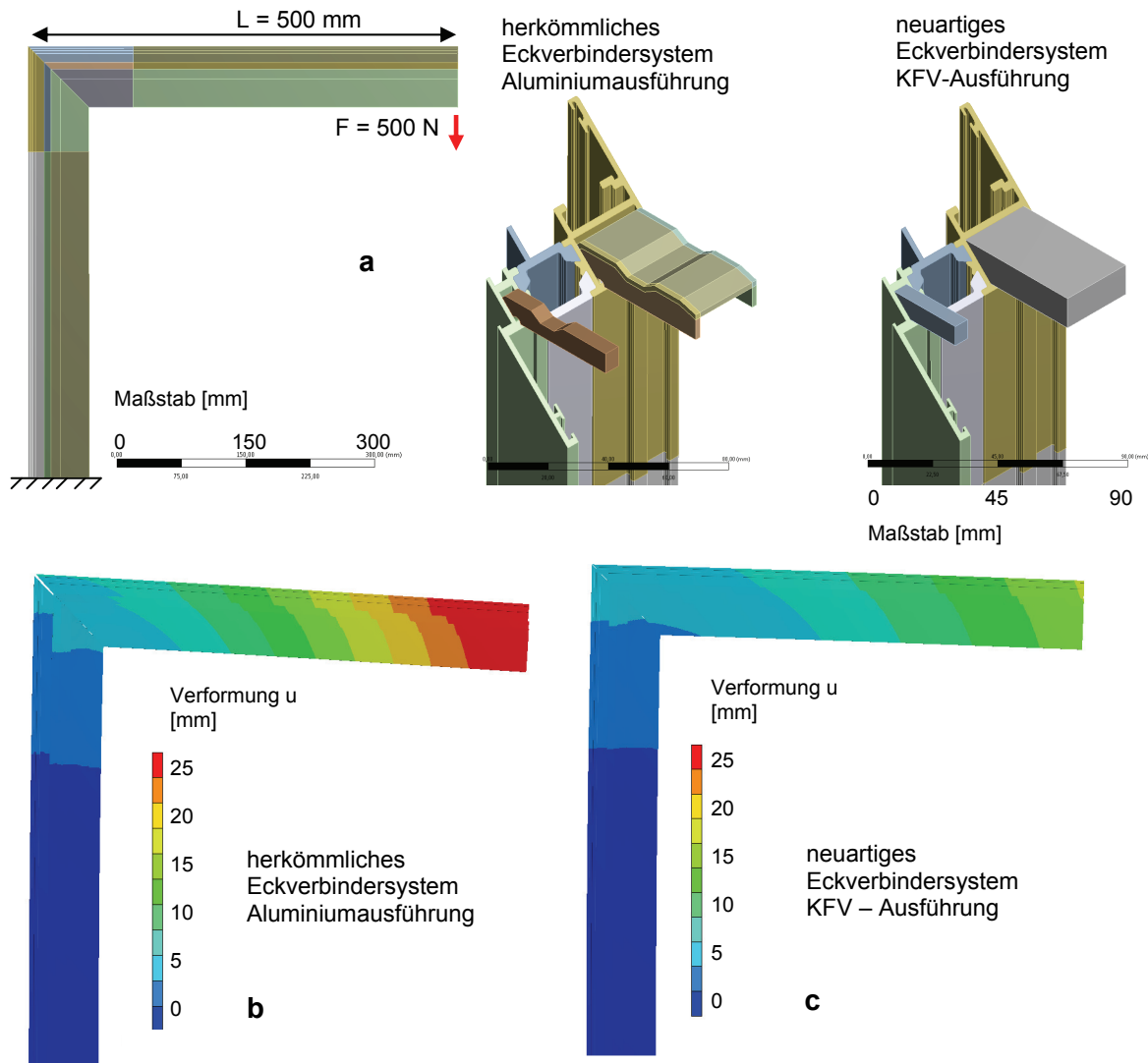


Abbildung A.49: Ergebnisse der FEM-Analyse unterschiedlicher Eckverbindersysteme; a: Belastungsmodell und unterschiedliche Ausführungsformen; b: Verformungen [mm] im Bereich der Eckverbindung eines herkömmlich gefügten Systems; c: Verformungen [mm] im Bereich der Eckverbindung eines mittels KfV-B gefügten Systems

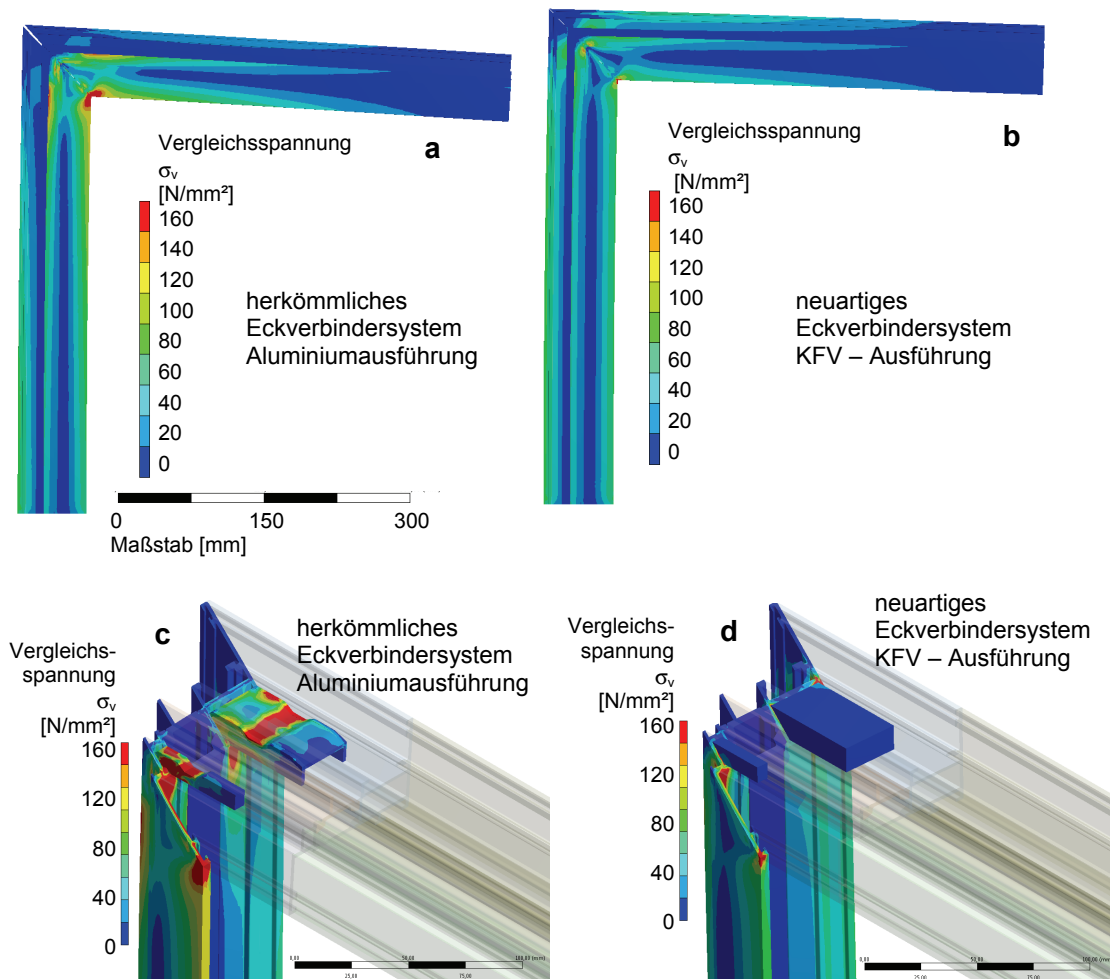


Abbildung A.50: Ergebnisse der FEM-Analyse unterschiedlicher Eckverbindersysteme mit Auflagerbedingung und Belastung nach Abbildung A.49 a; a: Vergleichsspannungen in einem herkömmlich gefügten Eckverbindersystem; b: Vergleichsspannungen in einem KFV-Eckverbindersystem; c: Vergleichsspannungen im Eckverbindungselement eines herkömmlichen Eckverbindersystems; d: Vergleichsspannungen im Eckverbindungselement in einem KFV-Eckverbindersystem

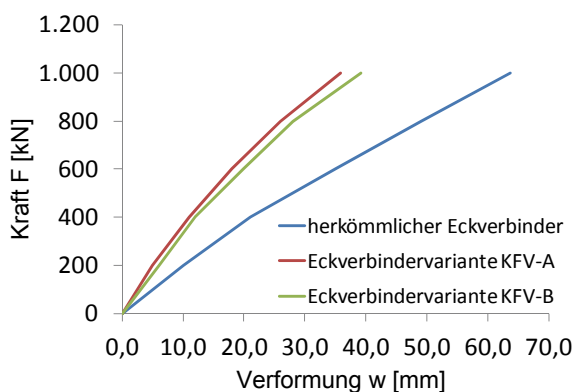


Abbildung A.51: Ergebnisse der FEM-Analyse des Last-Verformungs-Verhaltens unterschiedlicher Eckverbindersysteme

Die ermittelte Spannungsverteilung im KFV ist in Abbildung A.52 dargestellt. Dabei ist ein qualitativ ähnlicher Spannungszustand zu beobachten, wie er in einfachen Rahmeneckkon-

struktionen auftritt. Dieser Spannungszustand ähnelt qualitativ dem in Abbildung A.45a dargestellten Spannungszustand für den Fall eines einfachen adhäsiv wirksamen KfV-Eckverbindersystems.

Vergleichende Betrachtungen an andersartigen Profiltypen, z. B. der Fa. heroal, zeigen, dass großvolumige Hohlkästen erwartungsgemäß zu verminderten Beanspruchungen im KfV bei vergleichbarer Beanspruchung führen und somit mechanische Vorteile bieten. Demgegenüber steht ein höherer Materialeinsatz, was in Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mit einzubeziehen ist.

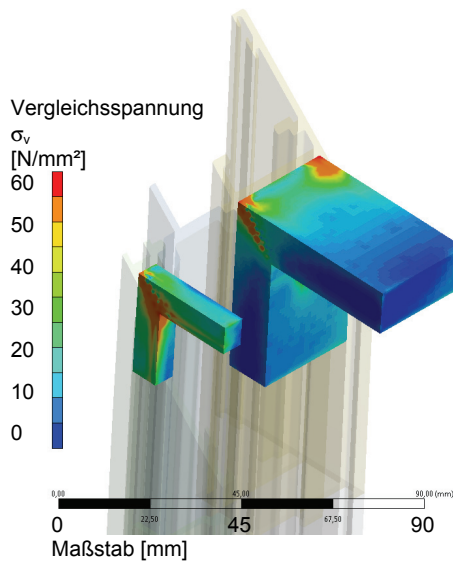


Abbildung A.52: Ergebnisse der FEM-Analyse der Beanspruchung im KfV mit Auflagerbedingung und Belastung nach Abbildung A.49 a; Vergleichsspannungen im KfV

A.7.4 Vergleichsbetrachtung an verschiedenen Fassadenelementen

Die Untersuchungen werden weiterhin für Fensterflügel mit eingeklotzten Glasscheiben durchgeführt. In diesen Versuchen wird deutlich, dass die Steifigkeit des Fensterflügels nach dem Einklotzen der Glasscheibe stark ansteigt. Als Referenzgeometrie für den Fensterflügel werden Abmessungen von 1000 mm x 1000 mm festgelegt. In experimentellen Untersuchungen konnten keine Relativverschiebungen zwischen Klebstoff und Metallprofil im Gebrauchstauglichkeitsbereich ermittelt werden. Das Adhäsionsvermögen des KfV an die Aluminiumwandung verhindert ein „Herausgleiten“ des KfV-Eckwinkels aus dem Hohlprofil. Durch die sehr direkte Ankopplung der Kräfte im Verbindungsbereich ist daher die ermittelte Gesamtsteifigkeit eines mit KfV gefügten Fensterflügels gegenüber einem herkömmlich gefertigten Fensterflügel wie in Abbildung A.53 dargestellt wesentlich erhöht. Die Versuchskonfiguration eines Fensterflügels mit eingeklotzter Glasscheibe zeigte einen elastischen Verformungsvorgang, gefolgt von einem plastischen Verformungsvorgang. Das Versagen erfolgte hier jedoch nicht schlagartig, da immer nur eine Eckverbindung zerstört wird und die Last sich auf das verbleibende Tragsystem verteilt. Damit ist eine zusätzliche Sicherheit geschaffen, die auch bei weiterer Verformung ein Herausfallen der Glasscheibe oder das Herabfallen von Fensterbauteilen verhindert.

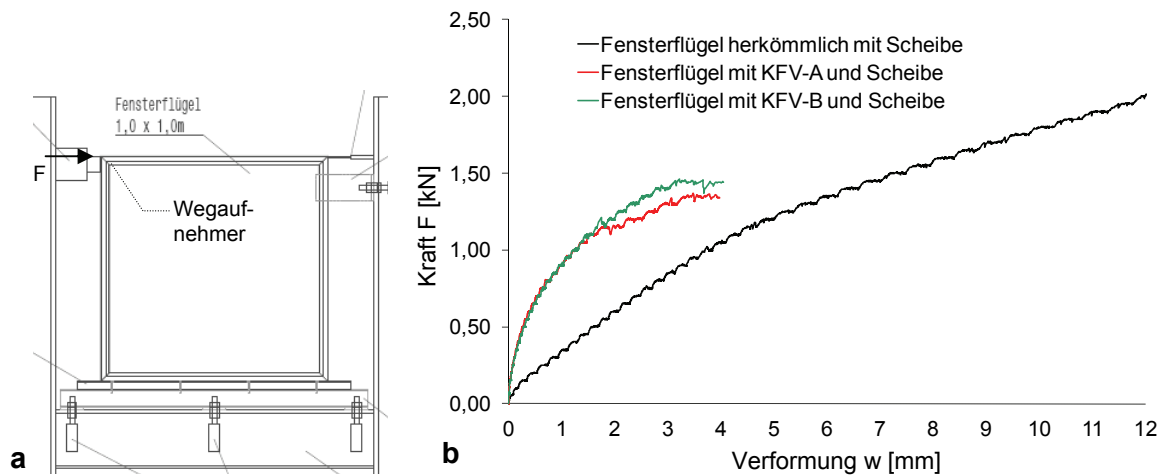


Abbildung A.53: Belastungsuntersuchung an Fensterflügel mit Glasscheibe; a: schematischer Versuchsaufbau; b: Last-Verformungs-Diagramm für unterschiedliche Eckwinkelausbildungen

Zum Abgleich der experimentellen Untersuchungen an komplexen Fensterflügelsystemen mit und ohne Verglasung werden numerische Analysen durchgeführt, in denen die unterschiedlichen Systemvarianten:

- Fensterflügel mit herkömmlichen Eckverbindungselementen,
- Fensterflügel mit KfV-A als Eckverbindungsvariante,
- Fensterflügel mit KfV-B als Eckverbindungsvariante,

gegenübergestellt wurden. Die Untersuchungen werden an dem Fensterflügelprofil Royal S65 der Fa. SCHÜCO durchgeführt.

Wesentliche Ausgangsparameter für die unterschiedlichen Analysen sind:

- Fensterflügel SCHÜCO Royal S65,
- Fensterflügelabmessungen (Aussenmaße): $b \times h = 1.000 \times 1.000 \text{ mm}^2$,
- Aluminiumeckverbinder herkömmlich $E = 70.000 \text{ N/mm}^2$,
- KfV-A: $E = 3.000 \text{ N/mm}^2$,
- KfV-B: $E = 12.500 \text{ N/mm}^2$,
- Untersuchung eines Fensterflügels ohne Glasscheibe,
- Untersuchung eines Fensterflügels mit eingeklotzter Glasscheibe $t = 6 \text{ mm}$,
- Untersuchung eines Fensterflügels mit eingeklebter Glasscheibe $t = 6 \text{ mm}$.

Abbildung A.54 zeigt Berechnungsergebnisse von numerischen Analysen an unterschiedlichen Fensterflügelsystemen. Dabei werden Fensterflügelsysteme ohne und mit eingeklotzter Glasscheibe miteinander verglichen. Es wird deutlich, dass der Verformungszustand qualitativ und quantitativ starke Unterschiede zwischen beiden Systemen aufweist.

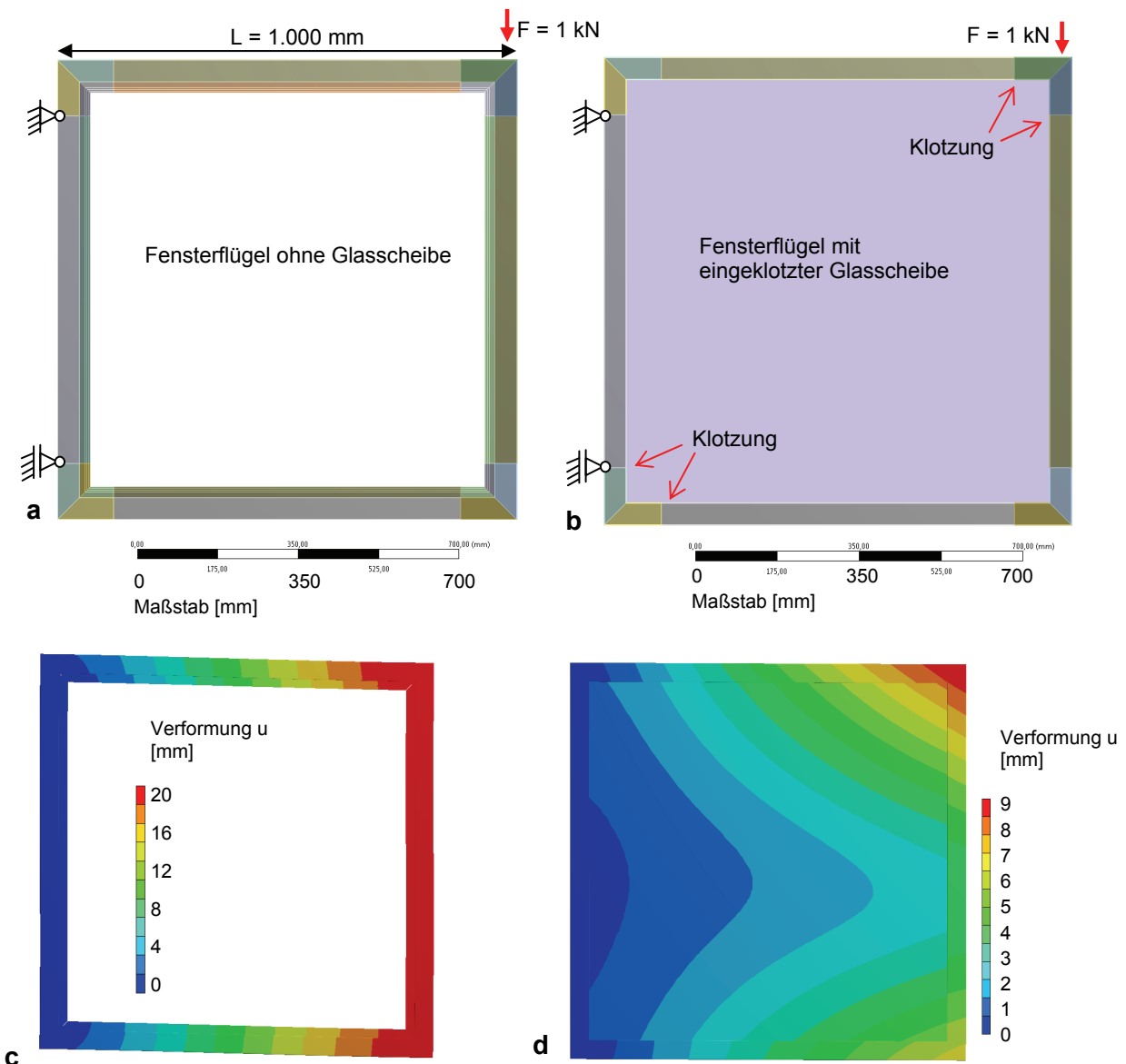


Abbildung A.54: Ergebnisse der FEM-Analyse unterschiedlicher Fensterflügelsysteme in KfV-Fertigungsweise; a: Belastungsmodell ohne Glasscheibe; b: Belastungsmodell mit eingeklotzter Glasscheibe; c: Verformungen [mm] des Fensterflügels ohne Glasscheibe; d: Verformungen [mm] des Fensterflügels mit eingeklotzter Glasscheibe $t = 6$ mm

Die Analyse der Vergleichsspannungen in Abbildung A.55 zeigt ebenfalls große Unterschiede zwischen beiden Systemen. Die Glasscheibe trägt nach dem Einklotzen in den Fensterflügel zu einer Aussteifung des Systems bei. Damit werden die Momentbeanspruchungen in den Eckbereichen des Fensterflügels wesentlich reduziert. Die Beanspruchungen im Eckbereich des Fensterflügelements sind dann von Quer- und Normalkräften dominiert.

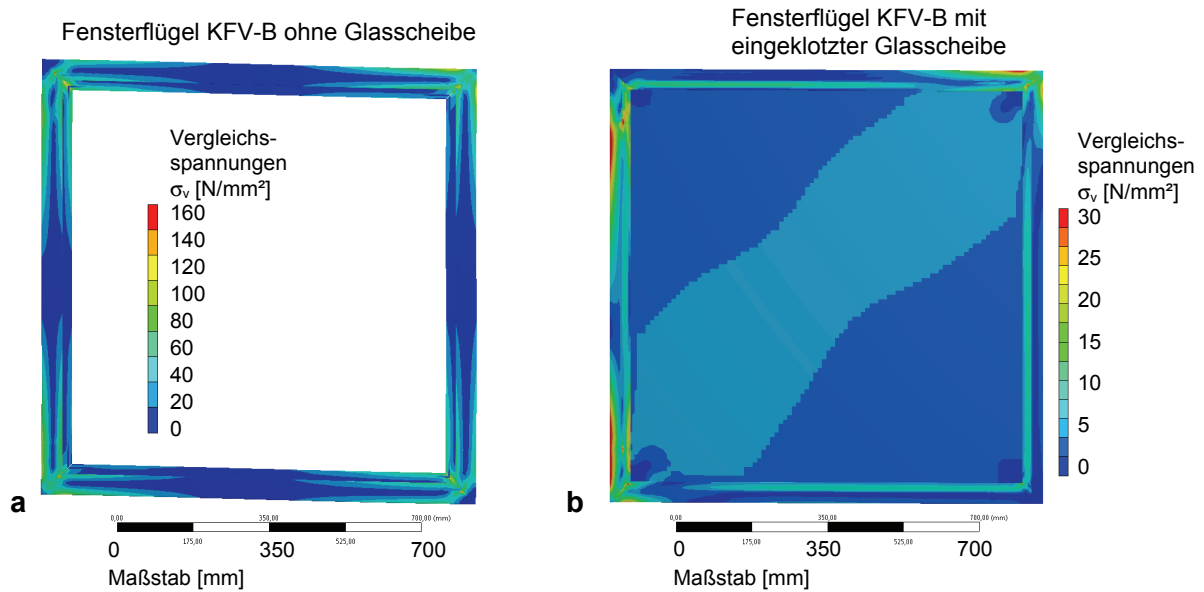


Abbildung A.55: Ergebnisse der FEM-Analyse unterschiedlicher Fensterflügelssysteme in KfV-Fertigungsweise mit Randbedingungen nach Abbildung A.54a; a: Vergleichsspannungen im Fensterflügel ohne Glasscheibe; b: Vergleichsspannungen im Fensterflügel mit eingeklotzter Glasscheibe

Abbildung A.56 zeigt den Verlauf der Vergleichsspannung im Eckbereich eines KfV-gefügtten Fensterflügels mit eingeklotzter Glasscheibe. Die Beanspruchungen innerhalb des KfV-Elements sind hierbei deutlich geringer als bei einem Eckverbindungselement, das nicht durch eine Glasscheibe ausgesteift wird (siehe Abbildung A.52).

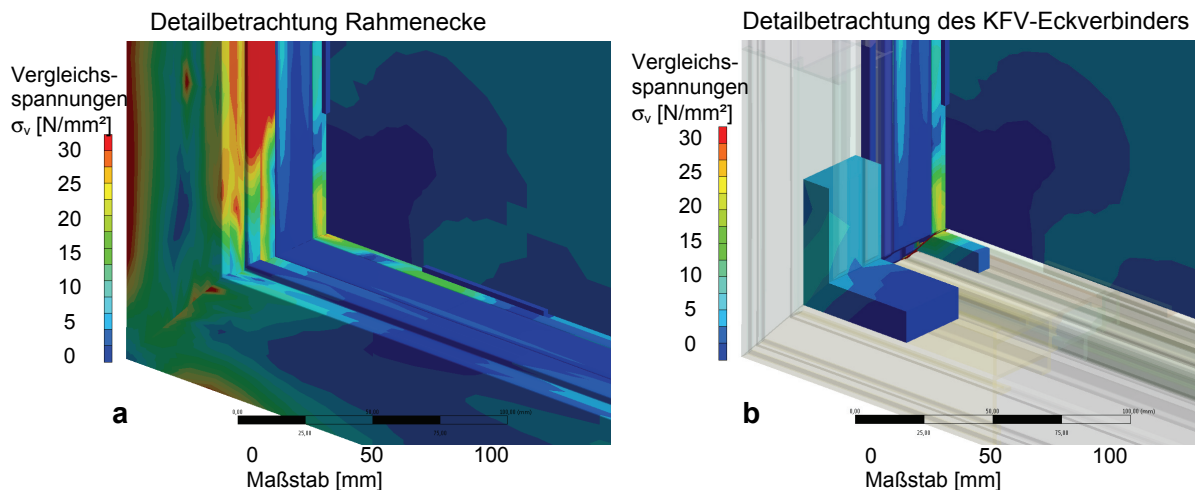


Abbildung A.56: Ergebnisse der FEM-Analyse eines Fensterflügels im Eckbereich bei eingeklotzter Glasscheibe mit Randbedingungen nach Abbildung A.54a; a: Vergleichsspannungen im Eckbereich (Aluminiumprofil); b: Vergleichsspannungen im KfV-Eckverbindererelement

Ein weiterer Steifigkeitszuwachs des Fassadenelementes kann durch das umlaufende Einkleben der Glasscheibe in den Fensterflügel erreicht werden. Dabei reduzieren sich zusätzlich die Beanspruchungen im Eckbereich der Fensterelemente. Ergebnisse einer numerischen Analyse mit eingeklebter Glasscheibe sind in Abbildung A.57 dargestellt.

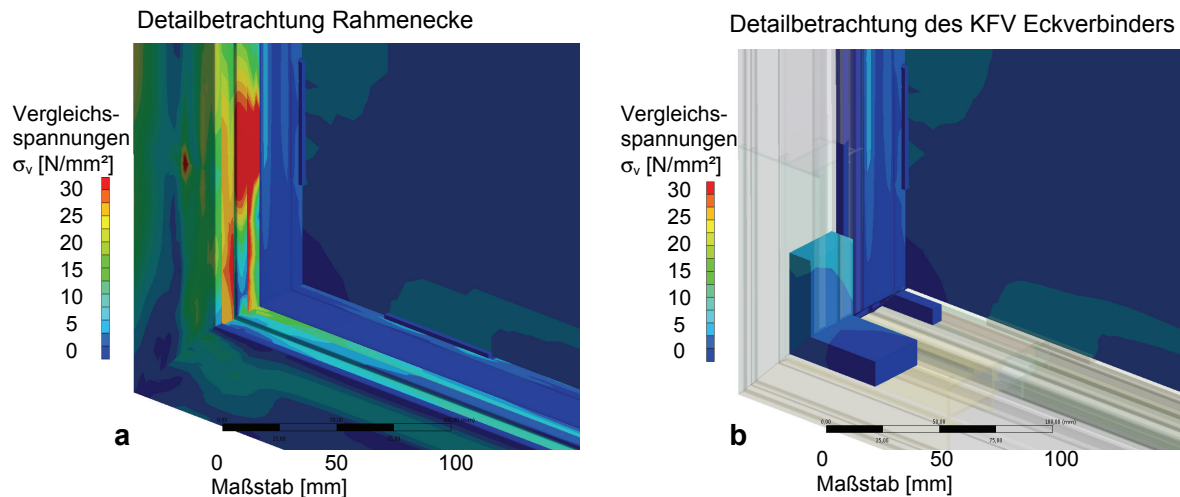


Abbildung A.57: Ergebnisse der FEM-Analyse eines Fensterflügels im Eckbereich bei eingeklebter Glasscheibe mit Randbedingungen nach Abbildung A.54a; a: Vergleichsspannungen im Eckbereich (Aluminiumprofil); b: Vergleichsspannungen im KfV-Eckverbinderelement

Abbildung A.58 zeigt einen Vergleich des Last-Verformungs-Verhaltens unterschiedlicher Fensterflügelsysteme ohne und mit Glasscheibe. Im Vergleich der unterschiedlichen Varianten ist festzustellen, dass Fensterflügelelemente, die mit der KfV-Fertigungsweise erstellt werden, eine deutlich höhere Steifigkeit besitzen als herkömmlich mit Aluminiumeckverbinder hergestellte Fensterflügel. Das gilt sowohl für Fensterflügelelemente ohne aussteifende Glasscheibe als auch für Fensterflügel mit eingeklotzter Glasscheibe. Die Kraft, die durch das Eckverbindungselement von einem Fensterflügelprofil in das benachbarte Fensterflügelprofil übertragen wird, muss bei der herkömmlichen Eckverbindungsvariante einen viel weiteren Weg zurücklegen als bei den direkt kraftschlüssig ankoppelnden KfV-Varianten.

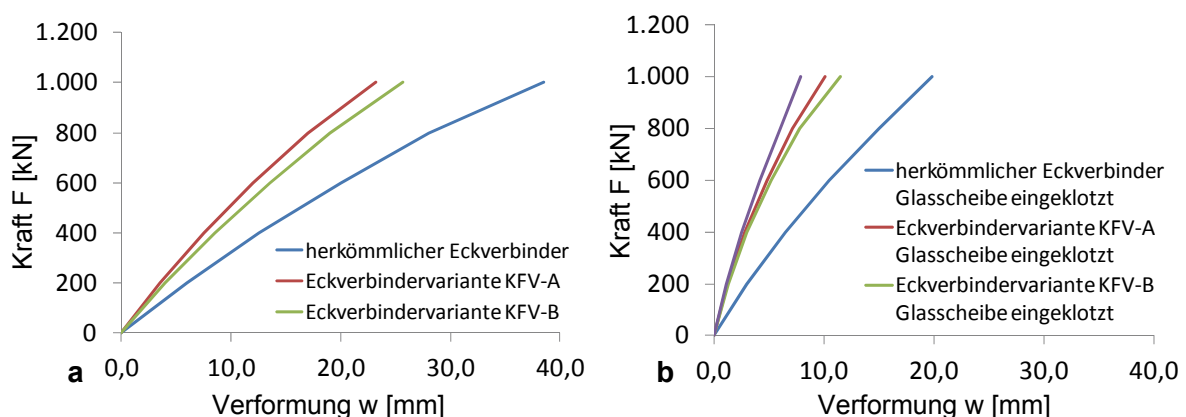


Abbildung A.58: Ergebnisse der FEM-Analyse zum Vergleich des Last-Verformungs-Verhaltens unterschiedlicher Eckverbindungssysteme im kompletten Fensterflügelelement mit Randbedingungen nach Abbildung A.54a; a: ohne aussteifende Glasscheibe; b: mit Glasscheibe eingeklotzt bzw. eingeklebt

Die Steifigkeit des Fensterelementes kann weiterhin durch das Einkleben der Glasscheibe umlaufend in den Fensterflügel gesteigert werden. Hier liegt auch die nächste Entwicklungsstufe für flexibel einsetzbare Fassadenelemente, bei denen ein optimales Verhältnis von Steifigkeit und Leichtigkeit erreicht werden kann.

A.7.5 Applikation und Herstellung von KfV-gefügten Fassadenelementen

Bei der Herstellung faserbewehrter Klebstoffsysteme hat sich aus den Experimenten folgende Vorgehensweise bewährt:

- Dosieren und Mischen der Klebstoffkomponenten Harz und Härter,
 - Füllstoffe können in den jeweiligen Klebstoffkomponenten vorkonfektioniert werden, wodurch das Einbringen der Füllstoffe nach dem Durchmischen der Klebstoffkomponenten entfällt.
- Einbringen und Mischen der Verstärkungsfasern,
 - Viskosität steigt stark an,
 - KfV-Mischungen weisen ein thixotropes Verhalten auf,
- Verarbeitung des KfV.

Der KfV-B ist im unausgehärteten Zustand pastös und weist eine hohe Viskosität auf. Mittels einer Spindel- oder Hydraulikpresse kann der KfV-B zur Injektion spritzfähig gemacht werden. Im Rahmen der Entwicklung von KfV-gefügten Fassadenelementen werden Fensterflügel mit dieser Herstellungstechnologie produziert. Abbildung A.59 zeigt die Herstellung eines Fensterflügels mit dem KfV-B als Verbindungsmittel für die Hohlprofilecken.

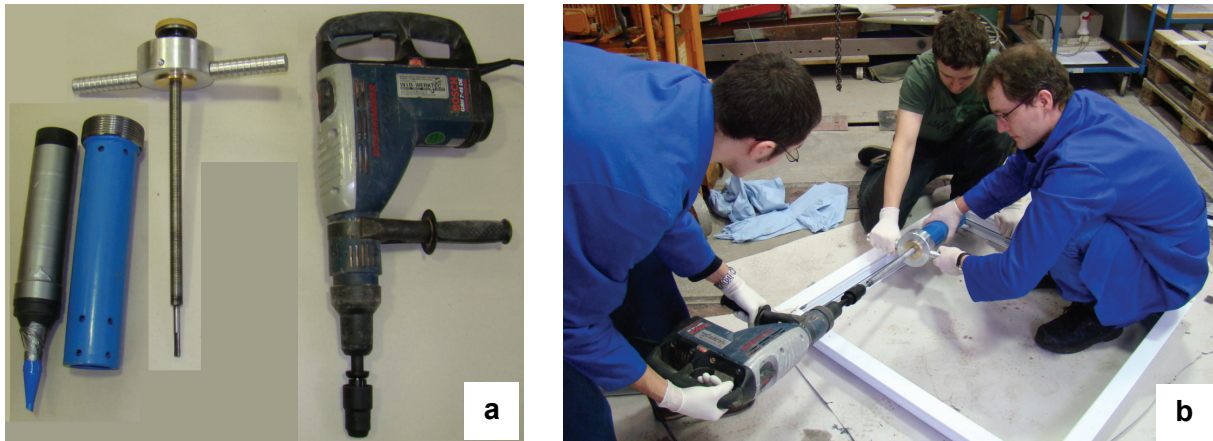


Abbildung A.59: Herstellung eines Fensterflügels in liegender Fertigungsweise; a: Bestandteile der Spritzvorrichtung; b: Einspritzen des KfV in ein Fensterflügelement

In der weiteren Entwicklung der Applikationssysteme für faserverstärkte Klebstoffe ist eine Fertigungstechnologie, wie sie in der Spritzgussindustrie eingesetzt wird, zu adaptieren.

A.8 KfV als Zugbewehrung von Beton

Insbesondere bei der Rekonstruktion von Bauwerken treten häufig Situationen auf, in denen es nicht möglich ist, Beton in der üblichen Weise mittels Stahl zu bewehren oder, wie heute auch gebräuchlich, Kunststofflamellen aufzukleben. Das Aufspachteln von faserbewehrten Kunststoffen könnte ein technologischer Ersatz für herkömmliche Bewehrungsarten sein und gleichzeitig bei entsprechender Ausbildung der Kunststoffe auch eine Schutzschicht, z. B. vor Angriff von Flüssigkeiten, Stauben usw., bilden.

A.8.1 Beanspruchungssituation / Tragsystem

Das mechanische System eines zugbewehrten Betonelementes besteht aus einem druckbeanspruchten Betonbereich und einem zugbeanspruchten Bewehrungsbereich. Beton kann

nur geringe Zugkräfte aufnehmen. Bei einmaliger Überschreitung der Zugfestigkeit, die etwa 10 % der Druckfestigkeit entspricht, treten Risse auf. Das Versagen ist hier geprägt von einem Adhäsionsversagen zwischen dem Zementstein und der Gesteinskörnung. Geringe Rissweiten stellen keine Einschränkungen für die Schubkraftübertragung in der Rissebene dar. Eine Zugkraftbewehrung hat die Aufgabe, auftretende Zugkräfte aufzunehmen und bei der Entstehung von Rissen im Beton die Rissweite zu begrenzen.

A.8.2 Experimentelle Untersuchungen

In ersten Versuchen soll die prinzipielle Einsatzfähigkeit der Kombination faserbewehrter Kunststoff – Betonträger getestet werden. Die Träger mit einer Länge $L = 1000$ mm und Querschnittsabmessungen $b \times h = 100 \times 100$ mm werden auf der Trägerzugseite mit KfV beschichtet und nach erfolgter Aushärtung im Vierpunkt-Biegeversuch belastet.

Unterschiedliche Querschnittskonfigurationen erlauben Aussagen zur Entwicklung von Festigkeitseigenschaften. Die Oberflächenbeschichtung erfolgte mit dem in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen KfV-B.

Balken Nr.	Balken-abmessungen	Beton	Bewehrung	Beschichtungs-dicke	Bemerkung
1	100x100x1000 mm	C45/55	4 Ø 6 mm	keine	Untersuchung der herkömmlichen Variante
2	100x100x1000 mm	C45/55	keine	keine	Untersuchung des unverstärkten Betonquerschnitts
3	100x100x1000 mm	C45/55	keine	7 mm	Beschichtung mit KfV-B
4	100x100x1000 mm	C45/55	keine	7,5 mm	Beschichtung mit KfV-B
5	100x100x1000 mm	C45/55	keine	10 mm	Beschichtung mit KfV-B
6	100x100x1000 mm	C45/55	keine	12 mm	Beschichtung mit KfV-B

Tabelle A-8: Untersuchte Betonquerschnitte mit unterschiedlicher Bewehrungsform

Die Bestimmung der Tragfähigkeiten der Betonbalken erfolgt am 4-Punkt-Biegeversuch. Abbildung A.60 zeigt die prinzipielle Versuchsanordnung. Die notwendigen Messdaten werden durch mechanische Wegaufnehmer und DMS erfasst. Die DMS sollen dabei insbesondere Aussagen zur Verteilung der Beanspruchung über die Querschnittshöhe und zum Auftreten von Rissen liefern. Die kontinuierliche Messung des Dehnungsfortschritts ermöglicht die Analyse des Beanspruchungs-Dehnungs-Verhaltens im zugbeanspruchten Balkenbereich. Dabei erhielten die Versuchsbalken ohne KfV, Balken 1 und 2, jeweils einen DMS direkt auf der Betonoberfläche, die beschichteten Balken 3 bis 6 werden mit zwei DMS, jeweils einem auf Beton- und KfV-Oberfläche, ausgerüstet. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abbildung A.60 dargestellt.

Die beiden ersten Versuche liefern Aussagen zum Tragverhalten der Betonbalken mit herkömmlicher und ohne Bewehrung. Die Versuche 3 – 6 ermöglichen es Aussagen zur Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Beschichtungs-Ist-Dicke zu treffen.

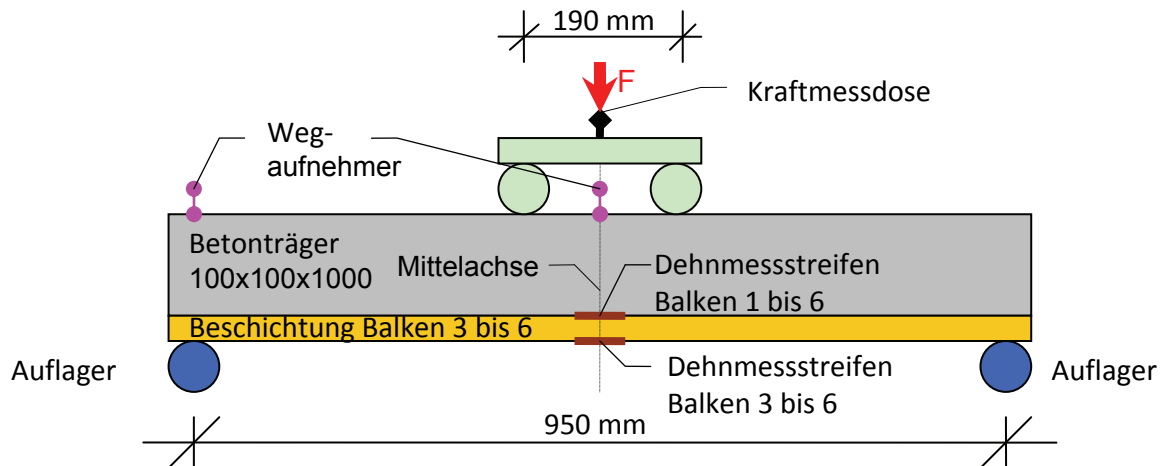


Abbildung A.60: Versuchsanordnung für die 4-Punkt-Biegeversuche

Die Messung der eingeleiteten Vertikalkraft F erfolgte mit einer Kraftmessdose am Lasteinleitungspunkt. Die Durchbiegung in Trägermitte wird mit einem Wegaufnehmer erfasst. Ein weiterer Wegaufnehmer im Auflagerbereich ermöglichte die Bestimmung der Auflagersetzung, woraus die tatsächliche Durchbiegung als Differenz zwischen gemessenem Weg in Feldmitte und am Auflager ermittelt werden kann. Abbildung A.61 verdeutlicht die Durchführung der Untersuchungen an den Betonträgern.

Für die Balken 1 – 4 wird die Lastaufbringung in Lastschritten von jeweils $\Delta F = 0,4 \text{ kN}$ realisiert. Nach Erreichen des jeweiligen Lastniveaus wird die Last für jeweils $t = 30 \text{ s}$ weggesteuert konstant gehalten. Bei Veränderung der Kraft wird die Verformung dementsprechend nachgeregelt. In diesen Laststufen erfolgte eine Steigerung bis zum Erreichen des Versagenszustandes.

Die Balken 5 und 6 werden kontinuierlich, ohne definierte Laststufen, bis zum Versagen belastet. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt $v_s = 0,125 \text{ mm/s}$. Die Umgebungstemperatur zum Versuchszeitpunkt beträgt $T = 23 \text{ °C}$.

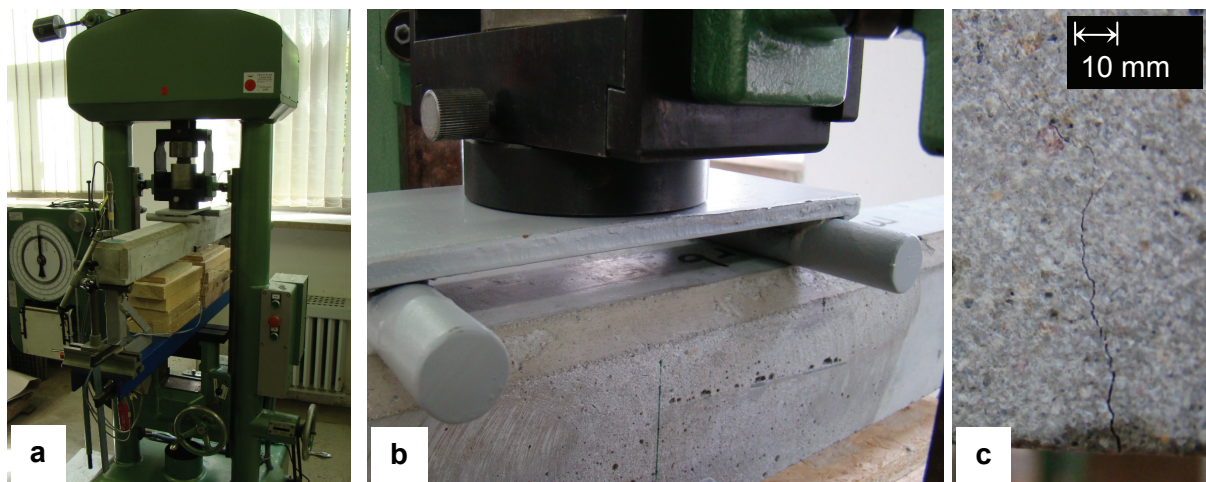


Abbildung A.61: Versuchsdurchführung; a: Prüfmaschine mit Lastgeschirr; b: Lasteinleitung; c: entstandener Riss

Die Last-Verformungs-Kurven von Balken 1 bis 6 sind in Abbildung A.62 dargestellt.

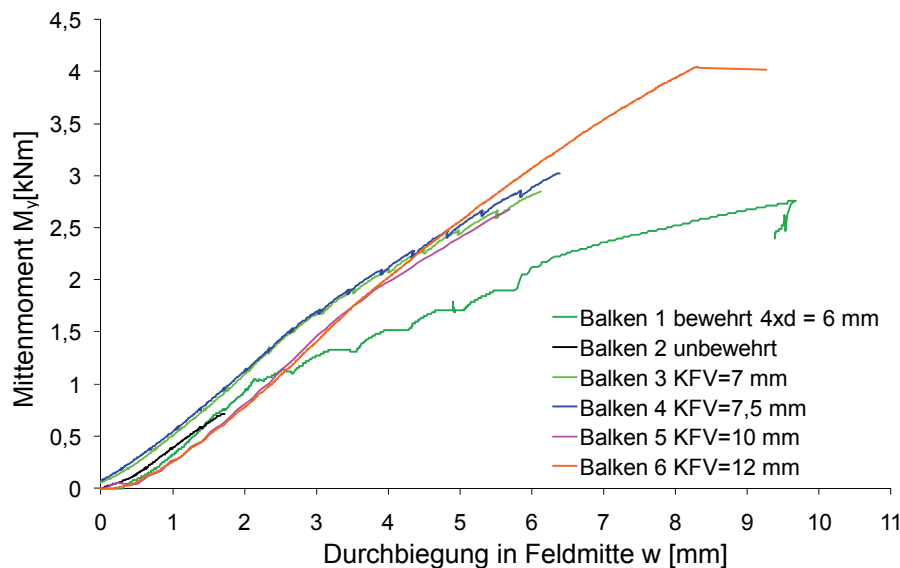


Abbildung A.62: Mittenmoment und Durchbiegung der getesteten Betonbalken

Bei der Versagensart wurden unterschiedliche Varianten beobachtet:

- Balken 1,
 - Plastizierung der Betonstahlbewehrung im Balkenzugbereich leitet Versagen ein,
 - nachfolgende Rissaufweitung an der Balkenunterseite führt zu einer Verkleinerung der Betondruckzone,
 - bei Belastung von ca. $F = 15 \text{ kN}$ schlagartiges Versagen in der Druckzone (siehe Abbildung A.63),
- Balken 2,
 - Versagen erfolgt erwartungsgemäß durch Bruch in der Zugzone zwischen den Lasteinleitungspunkten,
 - Bruch des unbewehrten Betonbalkens erfolgte ohne Vorankündigung,
- Balken 3 bis 6,
 - die beschichteten Betonbalken zeigen sehr komplexes Versagensverhalten,
 - geringere Durchbiegung der beschichteten Balken im Vergleich zur Betonstahlbewehrten Variante 1,
 - Risse im Beton weisen aufgrund der Wirkung der KFV-Beschichtung zunächst sehr geringe Breiten (nicht sichtbar) auf,
 - die über die gesamte Trägerbreite wirkende Beschichtung verteilt die Risse gleichmäßig und führt zu sehr feinem Rissbild (siehe Abbildung A.64a),
 - Risse können erst bei größerem Lastniveau optisch lokalisiert werden,
 - Bruch erfolgt ohne Vorankündigung (siehe Abbildung A.64b und c).

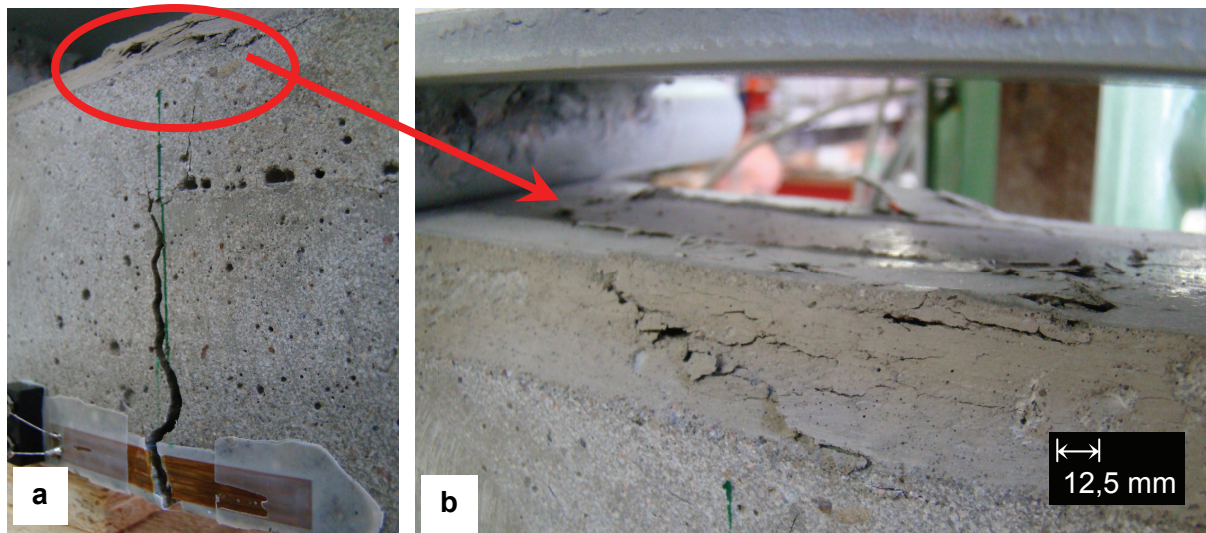


Abbildung A.63: Versagensbilder Balken 1, bewehrt mit 4 Ø 6 mm; a: Seitenansicht des Versagensbereiches; b: Detail Versagensbild des Druckbereichs

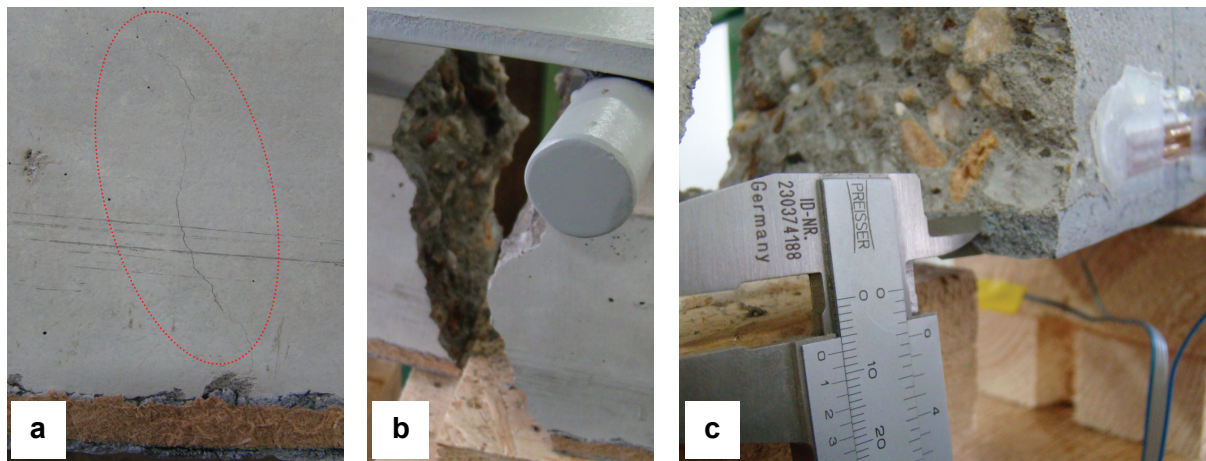


Abbildung A.64: Versagensbilder der KfV-beschichteten Betonträger; a: Entstehung von Rissen; b: Bruch; c: Ansicht des Querschnitts im Versagensbereich

Die vorhandenen DMS auf der Beton- und KfV-Oberfläche zeigen die Entstehung der Risse relativ deutlich an und ermöglichen eine Analyse der Kraftumlagerung zwischen Beton und KfV-Bewehrung. Damit können Rückschlüsse auf die Rissentstehung gezogen werden. Für die bessere Veranschaulichung der gemessenen Werte erfolgte eine Umrechnung der Dehnungen in Längsspannungen.

Die Umrechnung der Dehnungen in Spannungen erfolgt für die Werkstoffe Beton und KfV mit:

- $E_C = 35.000 \text{ N/mm}^2$,
- $E_{\text{KfV-B}} = 12.000 \text{ N/mm}^2$.

Abbildung A.65 verdeutlicht auf der Basis berechneter Spannungen die Entwicklung der Beanspruchungssituation bzw. der entstehenden Risse. Es ist deutlich zu beobachten, dass bei unbeschichteten Trägern ab einer Last von etwa $F = 2 \text{ kN}$ Rissbildungen zu beobachten sind, während bei beschichteten Trägern diese Last auf etwa $M_y = 1,33 \text{ kNm}$ ansteigt. Mit größerer Beschichtungsdicke wächst der Widerstand der Balken an, was zu erwarten war.

Die KfV-Schicht nimmt bei entstehenden Mikrorissen an der Grenzschicht zwischen KfV und Beton die Zugkraft auf und verhindert damit ein weiteres Risswachstum. Oberhalb von $M_y = 1,5 \text{ kNm}$ ist die Dehnung im KfV so groß, dass die Risse im Beton weiter wachsen können. Eine stärkere Beschichtungsdicke führt, bis zu einer definierten Grenze, zu höheren ertragbaren Lasten. Die berechneten Längsspannungen in Abhängigkeit des Biegemoments sind für die unterschiedlichen Träger in Abbildung A.65 dargestellt.

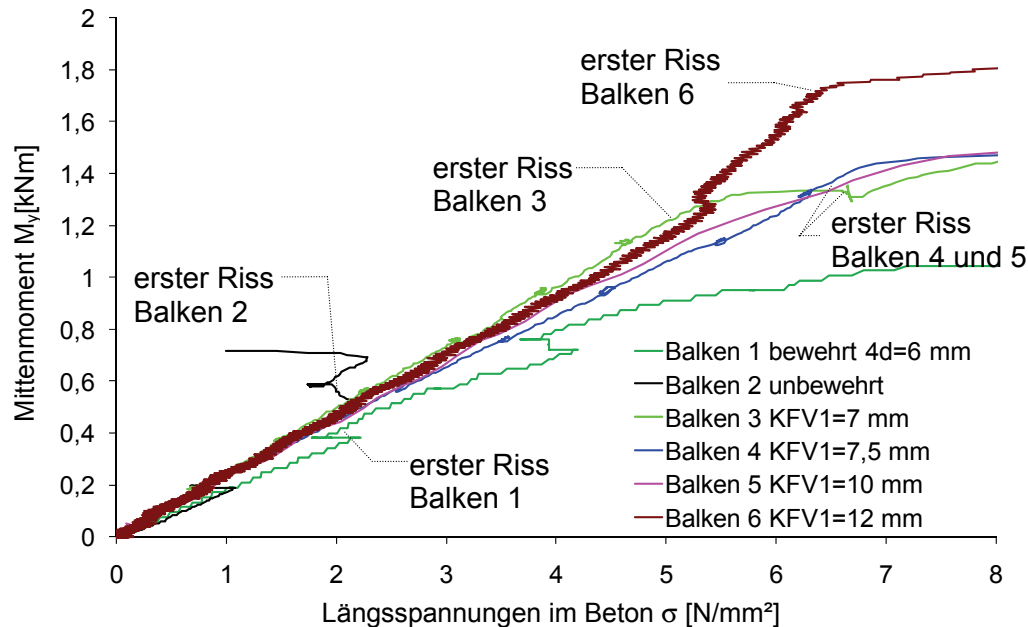


Abbildung A.65: Spannungszustand in den Betonträgern im Zugbereich

Abbildung A.66 verdeutlicht die Umlagerung der Beanspruchungen im Beton nach der Entstehung der ersten Risse in die KfV-Schicht. Die Beanspruchung im KfV nimmt mit fortschreitender Biegebeanspruchung überproportional zu. Die Grenzspannung erreicht dabei einen Bereich zwischen $\sigma = 22 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 34 \text{ N/mm}^2$. Diese Spannungen liegen deutlich unter den am Zugstab ermittelten Festigkeiten von Kunststofffasergemischen. Eine Ursache dafür könnte in der Entstehung von lokalen Kerbspannungen im Grenzschichtbereich zwischen Beton und KfV liegen. Diese Annahme lässt sich durch numerische Untersuchungen, die im folgenden Abschnitt A.8.3 dargestellt sind, bestätigen.

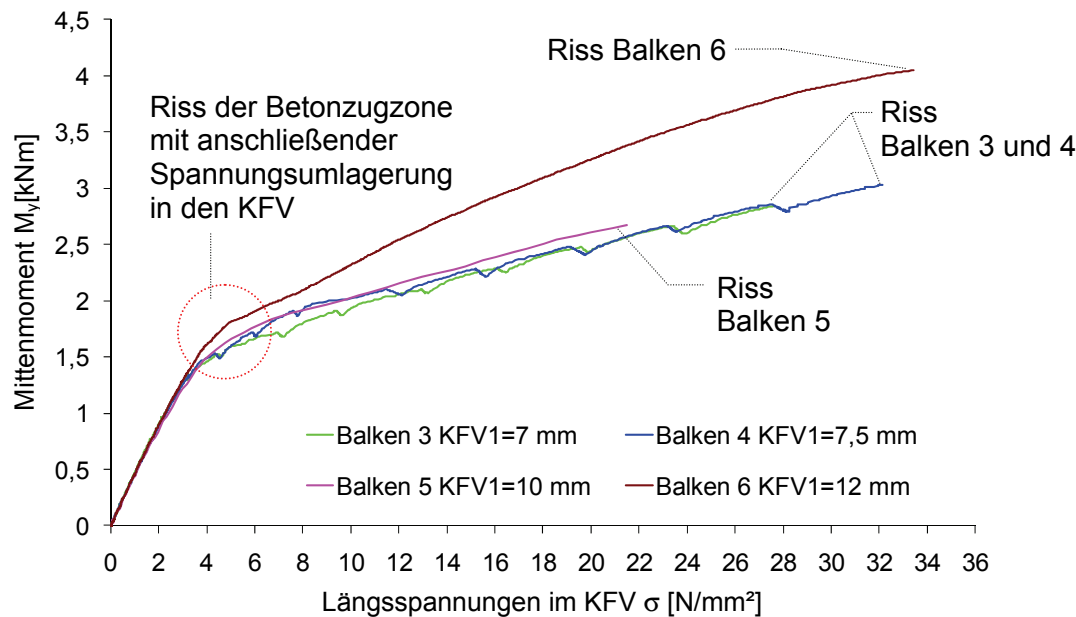


Abbildung A.66: Spannungen im KfV im Zugbereich bei unterschiedlichen Ausführungsvarianten

A.8.3 Numerische Analyse des 4-Punkt-Biegeversuches

Die numerische Analyse der Belastungsversuche ermöglicht eine detaillierte Darstellung der Beanspruchung im Betonträger und KfV bei verschiedenartigen Randbedingungen. Ausgehend von zwei zu untersuchenden Fällen - Betonbalken mit intakter Zugzone und Betonbalken mit gerissener Betonzugzone - werden unterschiedliche Simulationen durchgeführt. Bilineare Materialmodelle für den Beton und KfV ermöglichen eine Analyse des Schädigungsverhaltens im Werkstoff.

Berechnungsgrundlagen:

- bilineare Materialmodelle für Beton und KfV,
- $E_C = 35.000 \text{ N/mm}^2$ $\mu_C = 0,3$ $f_y = 45 \text{ N/mm}^2$ ideal plastisch,
- $E_{KfV} = 12.000 \text{ N/mm}^2$ $\mu_{KfV} = 0,3$ $f_y = 60 \text{ N/mm}^2$ ideal plastisch,
- $E_{St} = 210.000 \text{ N/mm}^2$ $\mu_{St} = 0,3$ Lasteintrag ideal elastisch.

Die Berechnungen erfolgten für den Versuchskörper Balken 6 mit $s = 12 \text{ mm}$ KfV-Schichtdicke. Im Berechnungsmodell mit gerissener Zugzone wird ein Riss in der Mitte des Betonträgers eingeführt. Bei der Modellierung mehrerer Risse an verschiedenen Stellen des Betonträgers nimmt die Verformung bei gleicher Last mit der Anzahl der Risse zu.

Die numerische Beschreibung des Belastungsversuchs erfolgte mit finiten Volumenelementen. Der Lasteintrag wird über Kontaktbedingungen modelliert, um die Versuchsbedingungen so realistisch wie möglich abzubilden.

Die Auswertung der Simulation des Belastungsversuchs mit ungerissener und gerissener Betonzugzone zeigt ein grundsätzlich verschiedenes Tragverhalten der beiden Balken. Für den Fall des ungerissenen Querschnitts ist, wie in Abbildung A.67 dargestellt, ein annähernd lineares Dehnungsverhalten über den gesamten Querschnitt zu beobachten. Für das Modell im gerissenen Zustand kann eine qualitativ sehr gute und quantitativ gute Näherung an die experimentell ermittelte Mittenmoment-Verformungs-Kurve erreicht werden. Dies bestätigt

ein frühzeitiges Auftreten von Mikrorissen in der Betonzugzone. Die Rissweite wird durch die Zugkraftübertragung in der KfV-Schicht begrenzt.

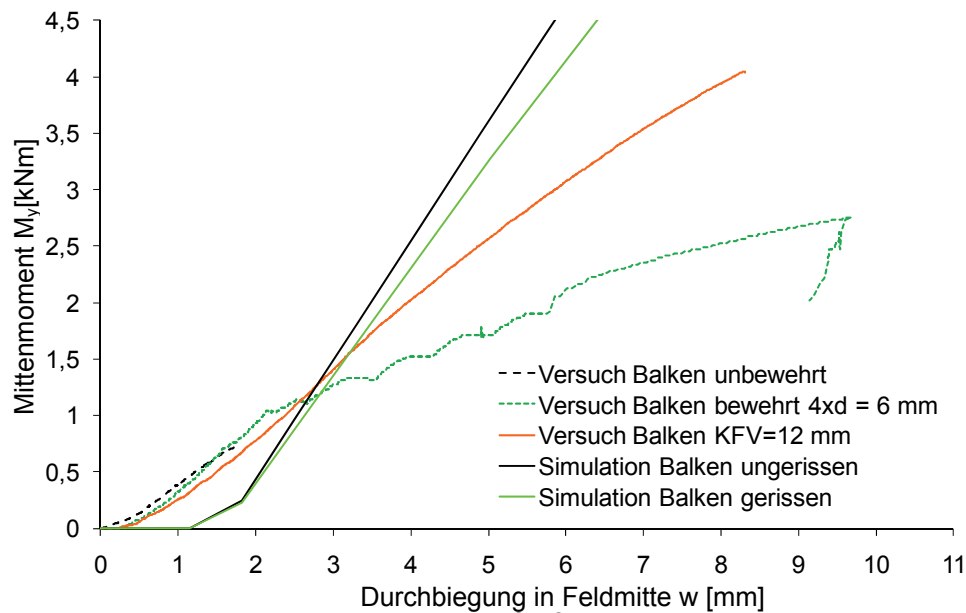


Abbildung A.67: Last-Verformungs-Kurven für Balken 6 - Vergleich zwischen mittels FEM und experimentell ermittelten Werten

Der geringere E-Modul des KfV führt dabei zu einem Sprung in der Höhe der Zugspannungen im Bereich der Grenzschicht zwischen Beton und KfV. Ergebnisse der numerischen Simulation eines Belastungsversuches am Balken 6 sind in Abbildung A.68 dargestellt.

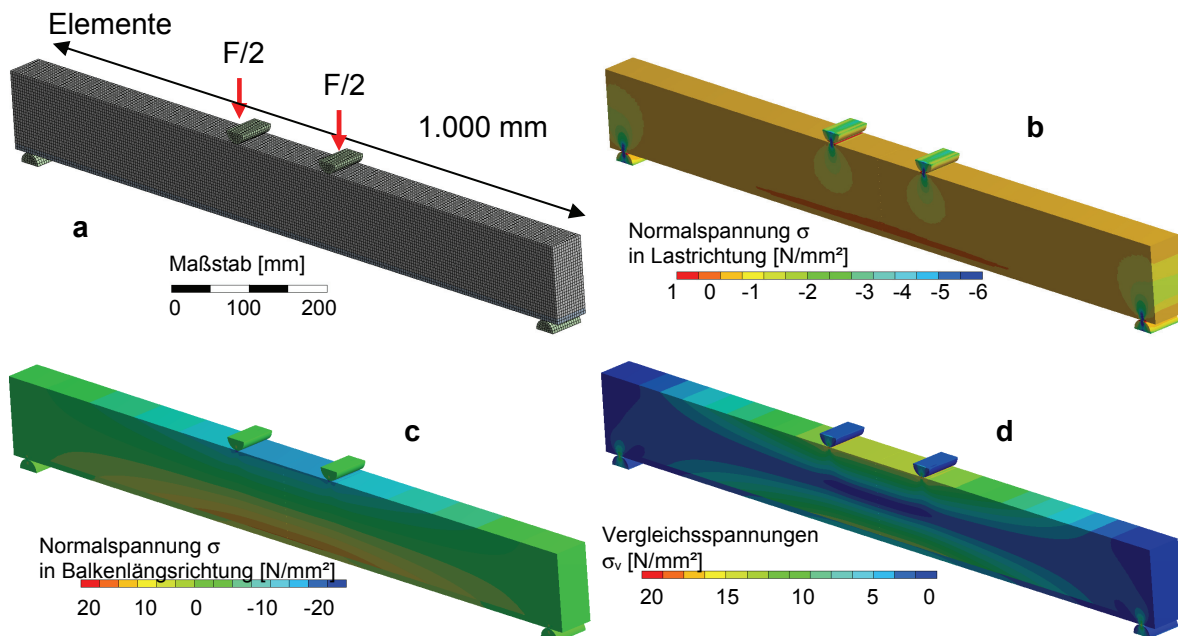


Abbildung A.68: Ergebnisse der FEM-Analyse vom Belastungsversuch an Balken 6 – ungerissener Zustand $M_y = 2,5 \text{ kNm}$ bei einer Mittendurchbiegung $w = 4 \text{ mm}$; a: geometrisches Modell mit Belastung; b: Normalspannungen in Richtung der eingetragenen Last; c: Balkenlängsspannungen; d: Vergleichsspannungen

Bei der Analyse mit gerissener Betonzugzone wird im Bereich des Risses die Zugkraft vom Betonquerschnitt über Schubkräfte in den KfV eingeleitet. Damit entstehen, wie in Abbildung A.69 dargestellt, lokale Spannungsspitzen um den Bereich der Betonrisse. Die Maximalspannung tritt am Rissort auf der betonseitigen Oberfläche des KfV auf.

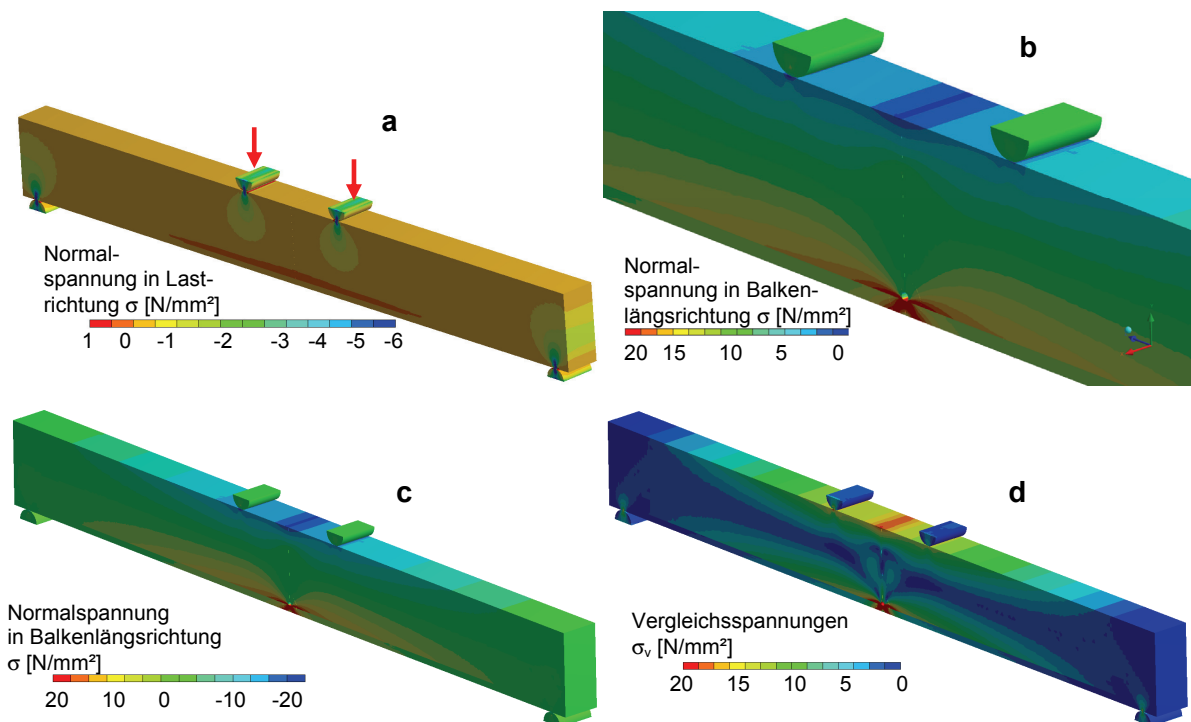


Abbildung A.69: Ergebnisse der FEM-Analyse vom Belastungsversuch an Balken 6 – gerissener Zustand $M_y = 2,5 \text{ kNm}$ Durchbiegung $w = 4,3 \text{ mm}$; a: Normalspannungen in Richtung der eingetragenen Last; b: Balkenlängsspannungen im Bereich des Risses; c: Balkenlängsspannungen gesamt; d: Vergleichsspannungen

Die Rissform hat einen wesentlichen Einfluss auf die maximale Kerbspannung. Die maximale Kerbspannung übersteigt die auftretenden Zugspannungen an der Außenseite des KfV im ungerissenen Bereich um ein Vielfaches. Damit können die experimentell mit DMS ermittelten Zugdehnungen begründet werden, die zum Versagenszeitpunkt des Trägers weit unterhalb der an Zugstäben ermittelten Zugfestigkeiten lagen.

A.8.4 Verbesserung von Adhäsions- und Kohäsionseigenschaften

Die Tragfähigkeit des KfV als Betonzugbewehrung ist im Wesentlichen von drei Faktoren abhängig:

- Kohäsionseigenschaft im KfV,
- Adhäsionseigenschaft zwischen KfV und Beton,
- Spannungsspitzen infolge Kerbstellen im KfV.

Die Kohäsionseigenschaften im KfV können durch eine Erhöhung des Faseranteils im KfV verbessert werden.

Die Adhäsion zwischen Beton und KfV stellt eine Grundvoraussetzung für die mechanische Kopplung zwischen KfV und Beton dar. Um eine gute mechanische Verbindung zwischen Beton und dem KfV zu erreichen, ist die Oberflächenvorbereitung des Betons erforderlich.

Öl, das als Trennmittel zum Ausformen verwendet wird, sowie die Zementschlempe müssen entfernt werden. Abbildung A.70 zeigt eine für den KFV-Auftrag bereitete Betonoberfläche.

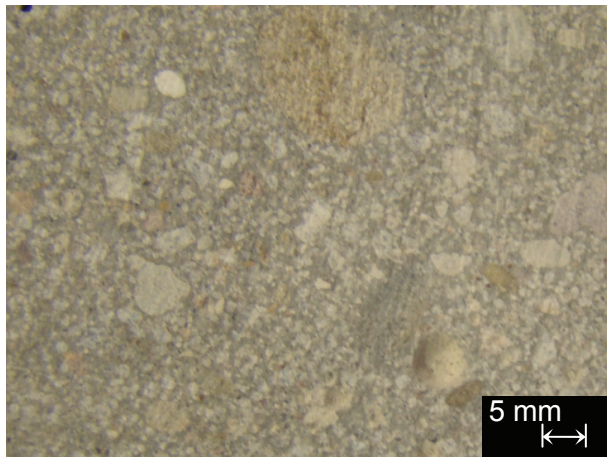


Abbildung A.70: Plangefräste Betonoberfläche vorbereitet für die Beschichtung mit KFV

Eine Möglichkeit zur Minimierung der Kerben im KFV, die durch Risse im Beton infolge Überschreitung der Zugfestigkeit des Betons entstehen, ist die Positionierung einer elastischen Zwischenschicht zwischen Beton und KFV. Dabei sollte der für den KFV verwendete ungefüllte und unverstärkte Klebstoff zur Herstellung der Zwischenschicht verwendet werden. Diese Zwischenschicht hat die Aufgabe, entstehende Risse im Beton auszugleichen und den Bereich, auf den die Risse in den KFV einwirken, auszuweiten. Damit werden die Kerben im KFV minimiert und der KFV kann höhere nominelle Spannungen aufnehmen.

A.8.5 Unterschiede zwischen Stabstahl- und KFV-Bewehrung

Die Anwendung von KFV als Bewehrung von Beton bietet gegenüber der Bewehrung aus Stabstahl den wesentlichen Vorteil, dass sie auch bei bestehenden Konstruktionen nachträglich aufgebracht werden kann. Einzige Voraussetzung dafür ist die Vorbehandlung der Betonoberfläche, wie in Abschnitt A.8.4 beschrieben. Die Wirkungsweise von KFV als Zugbewehrung lässt sich zwischen einer normalen schlaffen Stahlbewehrung und einer vorgespannten Stahlbewehrung einordnen. Die unter Belastung auftretenden Risse im Beton sind wesentlich kleiner als bei einer schlaffen Bewehrung, da auftretende Risse sofort von dem KFV in ihrer Größe begrenzt werden. Die Vorankündigung auf ein Versagen ist bei KFV-bewehrten Betonelementen wesentlich geringer ausgeprägt als bei Betonelementen, die mit Stabstahl bewehrt sind. Trotzdem weisen KFV-bewehrte Betonelemente bei hohen Belastungen ähnlich zu stabstahlbewehrten Betonelementen nichtlineare Last-Verformungsbeziehungen auf, sodass bei statisch unbestimmten Systemen begrenzte Schnittgrößenumlagerungen möglich sind. Damit können zusätzliche Sicherheitsreserven aktiviert werden.

Der Brandschutz von KFV-bewehrten Betonelementen stellt wie bei allen äußerlich aufgetragenen Bewehrungsarten (z. B. Stahlbänder, CFK-Lamellen usw.) ein durch konstruktive Maßnahmen zu lösendes Problem dar. Der Klebstoff im KFV verliert bei Temperaturen oberhalb $t > 100\text{ °C}$ seine Tragfähigkeit und beginnt sich zu zersetzen. Daher sind Brandlasten entweder zu vermeiden oder der KFV ist zusätzlich mit geeigneten wärmedämmenden Materialien zu beschichten.

A.9 Spezielle Betrachtungen an Alu-CFK-Hybridelementen

A.9.1 Werkstoffauswahl für die Herstellung von Alu-CFK-Hybridelementen

Für die Herstellung der Aluminium-CFK-Hybridelemente werden folgende Ausgangswerkstoffe ausgewählt:

- Aluminium,
 - EN AW-6005 A T6 anodisiert oder EN AW-6061 T6 anodisiert,
⇒ $R_{p0,2} = 215 \dots 240 \text{ N/mm}^2$, Bruchdehnung $A_{50 \text{ mm}} = 6 \%$,
 - anodisierte Aluminiumoberflächen weisen gute Klebeigenschaften bei geringer Streubreite der Adhäsion auf,
- CFK-Lamelle,
 - Speziallamelle mit IMS-Kohlenstofffasern und hohem Faserfüllgrad hinsichtlich der Druckfestigkeit optimiert und integrierten Abstandhaltern zur Sicherstellung einer definierten Mindestklebschichtdicke,
 - Vorspannung der Kohlenstofffasern während des Herstellvorgangs,
 - Längsorientierung der Kohlenstofffasern und Verringerung der Imperfektionen
⇒ Hoher E-Modul, $E_{\square} = 160.000 \text{ N/mm}^2$,
 - ⇒ hohe Zug- und Druckfestigkeit, $f_u^{\oplus} = 2.000 \text{ N/mm}^2$; $f_u^{-} = 715 \text{ N/mm}^2$,
 - Kohlenstofffasern stehen nach Aushärtung der Epoxidharzmatrix unter leichter Zugspannung,
- Klebstoff,
 - 2K-Polyurethanklebstoff, zusätzlich mit Partikeln gefüllt,
⇒ hohe Kohäsionsfestigkeit, gute Adhäsion an CFK und Aluminium,
⇒ ausreichende Elastizität zum Ausgleich der Temperaturdehnungsdifferenz zwischen Aluminium und CFK,
 - sehr gute Verarbeitungseigenschaften, ermöglicht robustes Fertigungsverfahren,
 - anaerobe Aushärtung bei Raumtemperatur unabhängig von Umgebungsmedien,
 - geringes Schwindmaß bei Aushärtung, damit Reduzierung von Eigenspannungen.

Die Optimierung der Systemeigenschaften ist immer als ein ineinandergreifender Prozess der Optimierung einzelner Systembestandteile zu begreifen. Das Systemversagen wird immer von einem Versagen des strukturell schwächsten Systembestandteils initiiert. Daher erscheint es sinnvoll, Schwachpunkte des Systems zu verbessern, um ein verbessertes Gesamtsystemverhalten zu erzielen. Verbesserungen eines Systembestandteils führen meist zu steigenden Anforderungen an andere Systembestandteile. Die Erhöhung der Steifigkeit oder Festigkeit der CFK-Lamelle führt beispielsweise zu erhöhten Anforderungen an die Klebverbindung, damit der Lasteintrag in die CFK-Lamelle sichergestellt werden kann.

A.9.2 Zweischnittige Schubversuche

Für die Untersuchung der Verbundeigenschaften zwischen Aluminium und CFK wurden unterschiedliche Werkstoffkombinationen ausgewählt. Die Ausgangswerkstoffe dazu sind:

- Aluminium: EN AW-6005A T6 anodisiert bzw. EN AW 6061 T6 anodisiert,
- Klebstoff: 2K-Polyurethan PU2,
- spezielle CFK-Lamelle.

Die experimentelle Untersuchung an unterschiedlichen Versuchskonfigurationen erlaubt eine modellhafte Untersuchung der Klebverbindung unter systemrelevanten Beanspruchungssituationen.

Die verwendeten CFK-Lamellen besitzen Querschnittsabmessungen von:

- $b \times t = 24 \times 2,5 \text{ mm}^2$.

Die Klebfläche hat rechteckige Abmessungen von:

- $A = m \times b \times L = 2 \times 25 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} = 1500 \text{ mm}^2$.
mit: m: Anzahl der Schubfugen,
b: wirksame Breite der Klebverbindung,
l: wirksame Länge der Klebverbindung.

Tabelle A-9 und Tabelle A-10 zeigen eine Zusammenstellung der durchgeführten Schubversuche an zweischnittigen Probekörpern.

	Aluminium	Klebstoff	CFK-Lamelle	Klebfläche	Versuchstemperatur	Anzahl Versuchskörper
EN AW-6005 T6 anodisiert PU2 -20°C	EN AW-6005 A T6 anodisiert t = 4 mm	PU2 Aushärtedauer: t = 4 Wochen	24x2,5 mm mit Abstandhalter	2 x 25 x 30 mm entspricht: $A_{\text{Klebfläche}} = 1500 \text{ mm}^2$ Klebschichtdicke t = 0,7 ... 1,0 mm	-20 °C	10
EN AW-6005 T6 anodisiert PU2 0°C					-0 °C	10
EN AW-6005 T6 anodisiert PU2 +20°C					+20 °C	10
EN AW-6005 T6 anodisiert PU2 +40°C					+40 °C	20
EN AW-6005 T6 anodisiert PU2 +60°C					+60 °C	14
EN AW-6005 T6 anodisiert PU2 +80°C					+80 °C	10

Tabelle A-9: Schubversuch an zweischnittiger Klebverbindung EN AW-6005 A T6 mit PU2

	Aluminium	Klebstoff	CFK-Lamelle	Klebfläche	Versuchstemperatur	Anzahl Versuchskörper
EN AW-6061 T6 anodisiert PU2 -20°C	EN AW-6061 T6 anodisiert t = 4 mm	PU2 Aushärtedauer: t = 4 Wochen	24 x 2,5 mm mit Abstandhalter	2 x 25 x 30 mm entspricht: $A_{\text{Klebfläche}} = 1500 \text{ mm}^2$ Klebschichtdicke t = 0,7 ... 1,0 mm	-20 °C	2
EN AW-6061 T6 anodisiert PU2 0°C					-0 °C	2
EN AW-6061 T6 anodisiert PU2 +20°C					+20 °C	2
EN AW-6061 T6 anodisiert PU2 +40°C					+40 °C	2
EN AW-6061 T6 anodisiert PU2 +60°C					+60 °C	2
EN AW-6061 T6 anodisiert PU2 +80°C					+80 °C	2

Tabelle A-10: Schubversuch an zweischnittiger Klebverbindung EN AW-6061 T6 mit PU2

Abbildung A.71 zeigt eine zweischnittige Schubprobe vor und nach dem Belastungsversuch. Die Auswertung der Schubfestigkeitsuntersuchungen erfolgt über den gemessenen Traversenweg der Zugprüfmaschine.

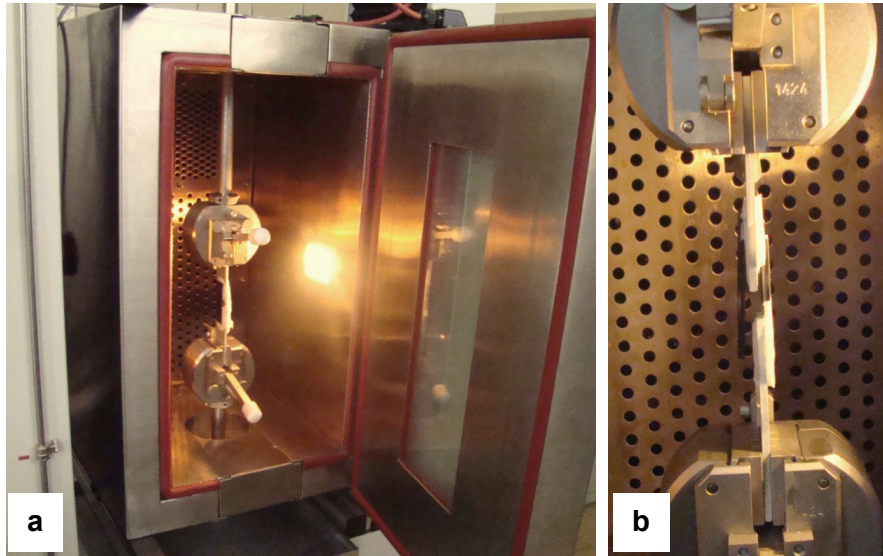


Abbildung A.71: Zugprüfeinrichtung in Klimakammereinhausung; a: Einhausung der Zugprüfeinrichtung; b: Probe nach Versagen der Klebverbindung;

Während der Schubversuche werden die Kraft und der Traversenweg gemessen. Der Versuch ermöglicht damit die Ermittlung der maximalen Schubbeanspruchbarkeit der Verbindung sowie eine Analyse des mechanischen Tragverhaltens der Klebverbindung bis unmittelbar vor Eintreten des Bruches. Damit kann eine Unterscheidung zwischen spröde eintretendem Versagen oder einem duktilen Versagensbild getroffen werden.

Die Messung des Traversenwegs beinhaltet in der Auswertung systembedingte Fehler, da Auflagerseitzungen und Traversenverformungen in dem Gesamtweg aufsummiert werden. Die in Abbildung A.72 auftretenden Unstetigkeitsstellen der Last-Verformungs-Kurven sind in Auflagerverschiebungen begründet und stellen kein partielles Versagen der Klebstoffverbindung dar. Ein Teil der Proben (siehe Abbildung A.72 und Abbildung A.73a) konnte aus technischen Gründen (zulässiger Bereich der Prüfmaschine) nicht bis zum Versagenszustand belastet werden.

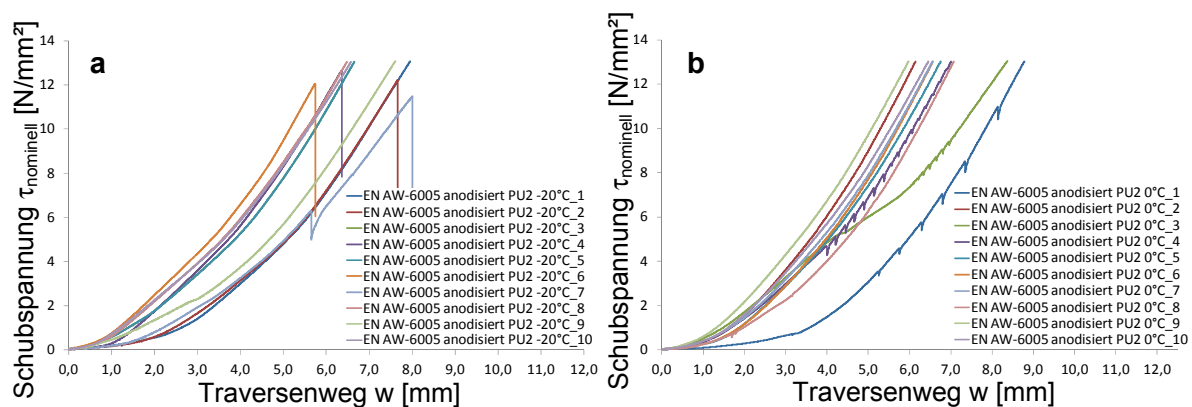


Abbildung A.72: Schubtragfähigkeit - Kurzzeitversuche PU2; a: Prüftemperatur von $v = -20^\circ\text{C}$; b: Prüftemperatur von $v = 0^\circ\text{C}$

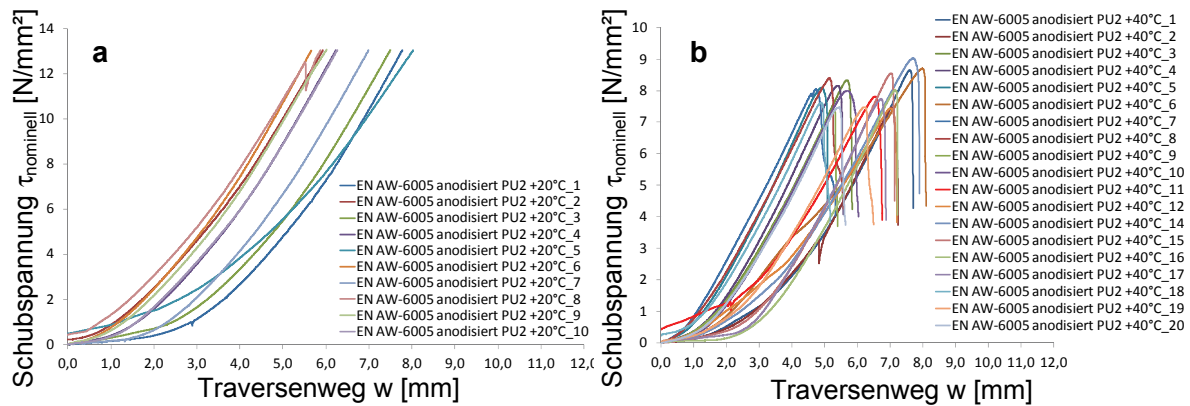


Abbildung A.73: Schubtragfähigkeit - Kurzzeitversuche PU2; a: Prüftemperatur von $v = +20^\circ\text{C}$; b: Prüftemperatur von $v = +40^\circ\text{C}$

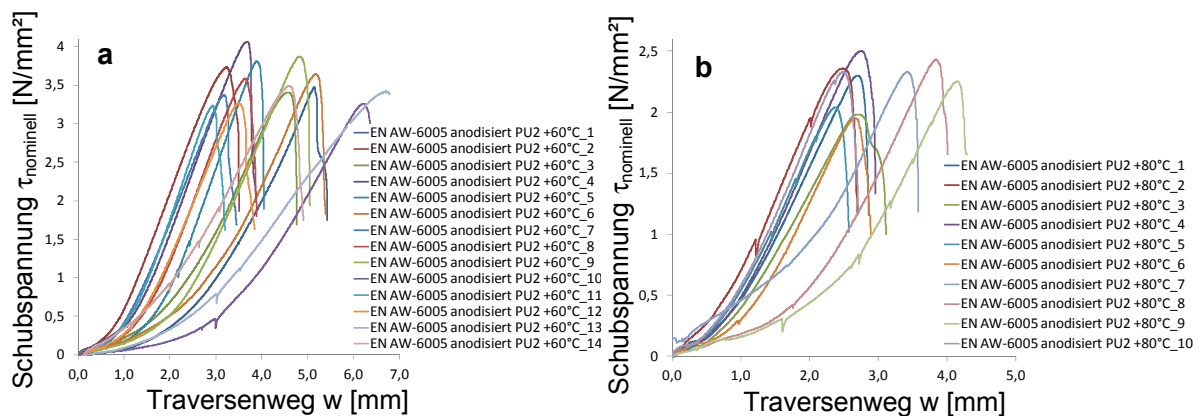


Abbildung A.74: Schubtragfähigkeit - Kurzzeitversuche PU2; a: Prüftemperatur von $v = +60^\circ\text{C}$; b: Prüftemperatur von $v = +80^\circ\text{C}$

Grundlage für die Bemessung der Klebverbindung hinsichtlich der zulässigen Schubspannungen bildet die in Tabelle A-11 aufgeführte statistische Auswertung der experimentell ermittelten Schubfestigkeiten.

Im Temperaturbereich $-20 \leq v \leq 20^\circ\text{C}$ konnten nur 4 von insgesamt 30 Probekörper zerstörend geprüft werden, da die verwendete Zugprüfmaschine auf eine maximal zulässige Zugkraft von $F = 20 \text{ kN}$ ausgelegt ist. Eine Fraktilwertbestimmung ist damit nicht möglich.

Versuchsbezeichnung	Temperatur	Anzahl Versuchskörper	Mittelwert τ_M	Standardabweichung σ	5 % Fraktilwert $\tau_{0,05}$ EN 1990
EN AW-6005 T6 anodisiert -20 °C	-20 °C	10	12,7 N/ mm ²	–	–
EN AW-6005 T6 anodisiert 0 °C	0 °C	10	13,0 N/ mm ²	–	–
EN AW-6005 T6 anodisiert +20 °C	+20 °C	10	13,0 N/ mm ²	–	–
EN AW-6005 T6 anodisiert +40 °C	+40 °C	20	8,0 N/ mm ²	0,48 N/ mm ²	7,2 N/ mm ²
EN AW-6005 T6 anodisiert +60 °C	+60 °C	14	3,6 N/ mm ²	0,30 N/ mm ²	3,0 N/ mm ²
EN AW-6005 T6 anodisiert +80 °C	+80 °C	10	2,2 N/ mm ²	0,21 N/ mm ²	1,8 N/ mm ²

Tabelle A-11: Statistische Auswertung der experimentell ermittelten Schubfestigkeiten

Die Auswertung der Schubfestigkeiten der Klebverbindung PU2 und der Aluminiumlegierung EN-AW 6061 T6 anodisiert zeigt höhere Festigkeiten als die mit der Aluminiumlegierung EN-AW 6005 A T6 anodisiert.

A.9.3 CFK-Lamellen-Auszugversuche

Analog zu den Scherzugversuchen an zweischnittig geklebten Probekörpern erfolgt eine statistische Auswertung und Berechnung der unteren Fraktilwerte als Grundlage einer späteren Bemessung der Klebverbindung. Die Auswertung erfolgt in Tabelle A-12.

Bezeichnung des Auszugsversuches	Prüftemperatur	Anzahl Versuchskörper	Mittelwert τ_M	Standardabweichung σ	5% Fraktilwert $\tau_{0,05}$ EN 1990
EN-AW 6005 A T6 PU2 T= 22 °C	22 °C	10	13,72 N/ mm ²	0,24 N/ mm ²	13,25 N/ mm ²
EN-AW 6005 A T6 PU2 T= 40 °C	40 °C	12	9,53 N/ mm ²	0,595 N/ mm ²	8,39 N/ mm ²
EN-AW 6061 T6 PU2 T= 22 °C	22 °C	9	13,1 N/ mm ²	0,61 N/ mm ²	11,9 N/ mm ²
EN-AW 6061 T6 PU2 T= 40 °C	40 °C	8	7,4 N/ mm ²	0,66 N/ mm ²	6,0 N/ mm ²

Tabelle A-12: Statistische Auswertung der experimentell ermittelten Schubfestigkeiten

A.9.4 Auszugversuche nach Temperaturwechselbeanspruchung

Zur Ermittlung der Auswirkungen von Temperaturwechseleinwirkungen auf den Aluminium-CFK-Lamellenverbund wurden Auszugversuche an entsprechend vorbelasteten Verbundfugen durchgeführt. Parameter der Vorbelastung sind in Abschnitt 4.1.4 auf Seite 128 ff. beschrieben.

Probengeometrie und Versuchsdurchführung sind analog zu den in Abschnitt 4.1.4 ab Seite 128 ff. dargestellten Ausführungen. Die Einbindetiefe der CFK-Lamelle bei den Auszugversuchen beträgt $L = 60 \text{ mm}$.

Die experimentell ermittelte Schubtragfähigkeit sowie die Schubsteifigkeit werden mit vergleichbaren Daten von Auszugversuchen an klimatisch unbelasteten Proben gegenübergestellt. Das erlaubt eine Beurteilung der Beständigkeit der Klebverbindung gegenüber Temperaturwechselbeanspruchungen.

Die Steifigkeit der Klebverbindung nimmt durch die Klimabelastung ab. Eine Erklärung hierfür ist die mechanische Vorbelastung des Klebstoffs infolge der Klimawechselbeanspruchung. Wiederholte Relativverschiebungen zwischen CFK-Lamelle und Aluminiumoberfläche führen zu viskoplastischen Effekten, die eine Reduzierung der Steifigkeit der Klebverbindung bewirken. Abbildung A.75 zeigt den auf nominelle Schubspannungen umgerechneten Kraft-Verschiebungsverlauf von Auszugversuchen der Klebverbindung mit PU2 nach klimatischer Beanspruchung.

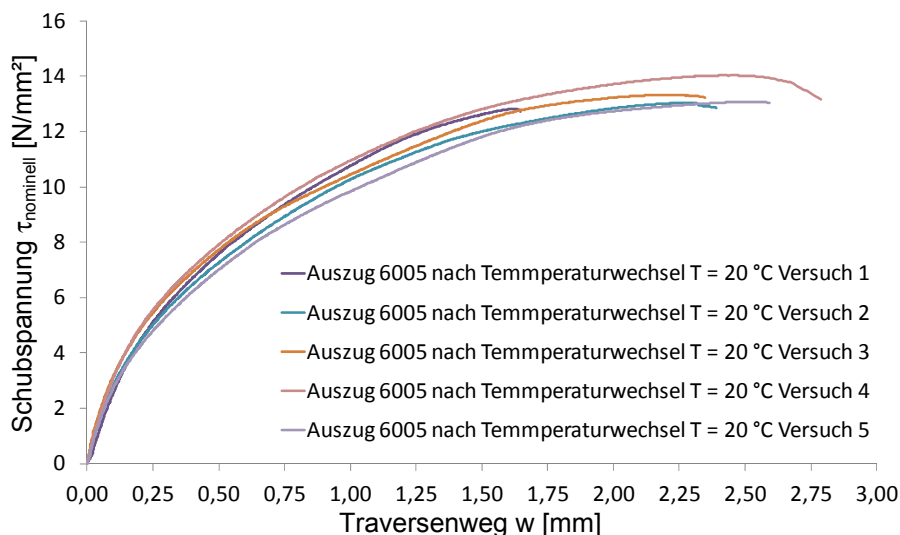


Abbildung A.75: Schubtragfähigkeit nach klimatischer Belastung; Klebstoff: PU2; Aluminium: EN AW-6005 A T6 anodisiert; Prüfung nach 300 Klimawechsel $-25^\circ\text{C} \Leftrightarrow v \Leftrightarrow +80^\circ\text{C}$

Im Ergebnis der Auszugversuche kann keine wesentliche Verringerung der maximalen Auszugkraft gegenüber einer nicht klimatisch belasteten Probe festgestellt werden.

Die statistische Auswertung der erreichten nominellen Schubtragfähigkeiten zeigt Tabelle A-13. Verglichen mit den Versuchen an nicht klimabeanspruchten Klebverbindungen ist ein leichter Anstieg der Streuung der Ergebnisse zu beobachten, der Mittelwert der Scherfestigkeiten erfährt dabei jedoch keine wesentliche Änderung.

	Temperatur	Anzahl Versuchskörper	Mittelwert τ_M	Standardabweichung σ	5 % Fraktilwert $\tau_{0,05}$ EN 1990
Auszugversuch nach Temperaturwechsel EN-AW 6005 A T6 PU2	20 °C	5	13,3 N/ mm ²	0,47 N/ mm ²	12,2 N/ mm ²

Tabelle A-13: Statistische Auswertung der Schubtragfähigkeit nach Klimawechselbeanspruchung

A.9.5 Einfeldträger unter Kurzeinwirkung

An Einfeldträgern werden umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich des Tragverhaltens unter statischer und thermischer Belastung durchgeführt. Dabei werden unterschiedliche Belastungssysteme verwendet. Das Verhältnis von Momentbeanspruchung zu Querkraftbeanspruchung wird dabei variiert. Das Belastungsmodell eines 10-Punkt-Biegeversuches mit 8 m Stützweite ist in Abbildung A.76 dargestellt. Das Belastungsmodell eines 6-Punkt-Biegeversuches ist in Abbildung A.77 für 6 m Stützweite, und in Abbildung A.78 für 4 m Stützweite dargestellt.

Die Bauteiluntersuchungen an Einfeldträgern dienen der Bestimmung der Tragfähigkeitseigenschaften wie:

- Last-Verformungs-Verhalten,
- temperaturabhängige Werkstoffeigenschaften,
- lokales Tragverhalten in der Verbundfuge,
- Grenztragfähigkeit und Versagensmuster,
- Dauerhaftigkeit.

Die Versuche werden kraftgesteuert mit Entlastungszyklen gefahren. Nach Feststellung der elastischen Grenzbelastung wird die Versagenslast weggesteuert angefahren. Aufgrund der bei den 8m-Trägern erreichten Durchbiegungen ist es technisch nicht möglich, die Hybridträger bis zum Erreichen ihrer Traglast zu beanspruchen. Bei Trägerlängen von $L \leq 6$ m kann die Traglastgrenze aufgrund der geringeren Durchbiegungen besser ermittelt werden.

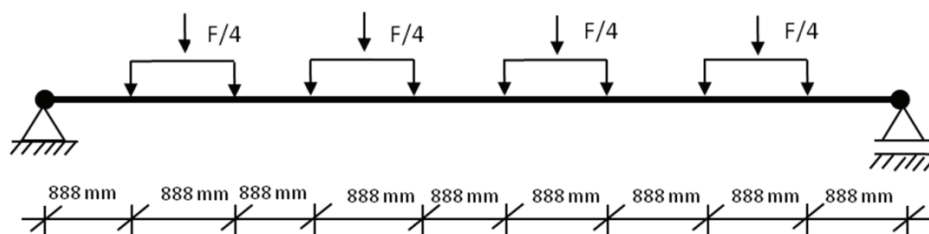


Abbildung A.76: Versuchsanordnung für Trägerversuch $L = 8$ m

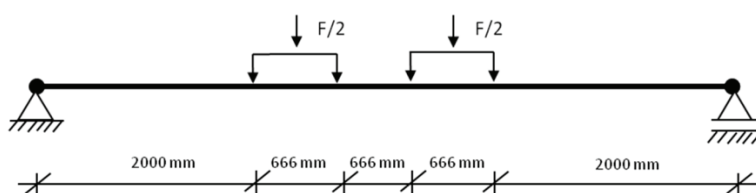
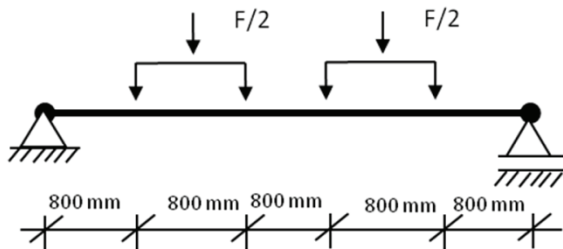
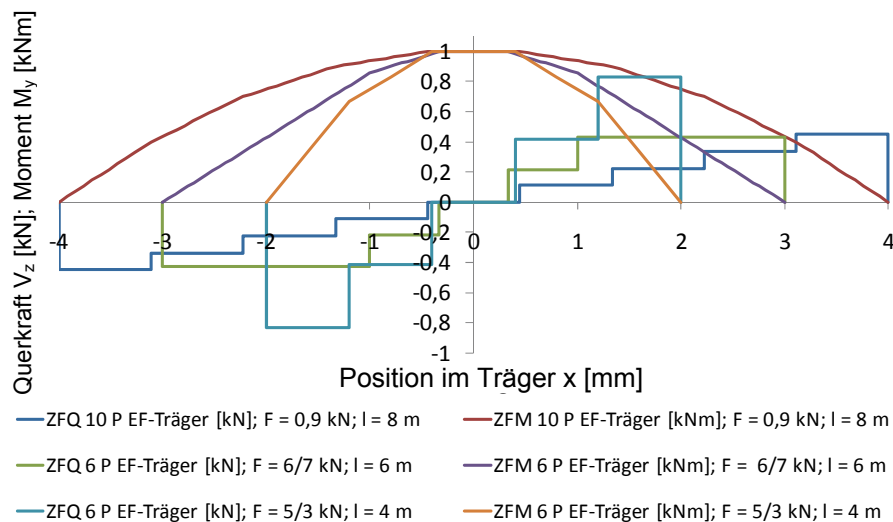


Abbildung A.77: Versuchsanordnung für Trägerversuch $L = 6$ m

Abbildung A.78: Versuchsanordnung für Trägerversuch $L = 4 \text{ m}$

Die Einfeldträger werden vorwiegend um ihre starke Achse mit einer Biegebeanspruchung belastet. Querkraftbeanspruchungen sind dabei eher untergeordnet zu betrachten. Für die verschiedenen Versuchsanordnungen sind die Beziehung zwischen Moment- und Querkraftbeanspruchung, bezogen auf ein Mittenmoment von $M_y = 1 \text{ kNm}$, in Abbildung A.79 dargestellt.

Abbildung A.79: Moment-Querkraftbeziehung der analysierten Einfeldträger bezogen auf ein Mittenmoment von $M_y = 1 \text{ kNm}$

Um eine Validierung der numerischen Modelle mittels experimentell ermittelter Kenngrößen zu ermöglichen, werden folgende messtechnische Kenngrößen während der Experimente aufgenommen:

- Kräfte der Lasteinleitungspunkte,
- Durchbiegung in Trägermitte,
- Längsdehnung in Trägermitte an der zugbeanspruchten Trägerunterseite und im Steg bei $h = 1/5$ der Gesamtquerschnittshöhe.

Die Endauflager sind längsverschieblich angeordnet, um Zwängungen infolge einer Verkürzung des Trägers bei großen Durchbiegungen zu vermeiden. Zur Reduzierung lokaler Lasteinleitungskonzentrationen wird die Belastung über Lastverteilungstraversen in die theoretische Nulllinie des Trägers eingeleitet. Dies wird über Bolzen mit $\varnothing 10 \text{ mm}$ realisiert.

Wesentliche Details der Versuchsdurchführung sind in Abbildung A.80 bis Abbildung A.83 dargestellt.

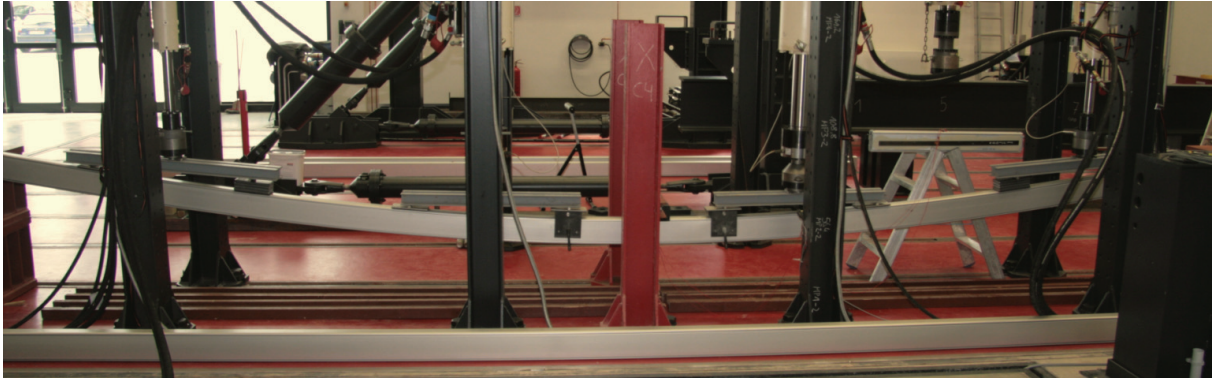


Abbildung A.80: 8m-Träger Typ 1 im Bereich der elastischen Grenzverformung

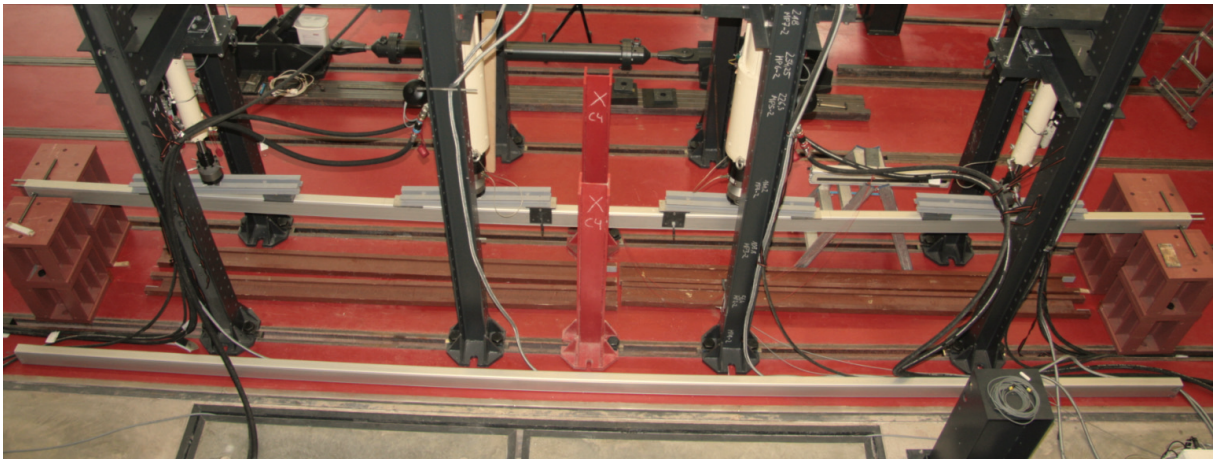


Abbildung A.81: Versuchsstand mit Lastgeschirr - 8m-Träger Typ 1

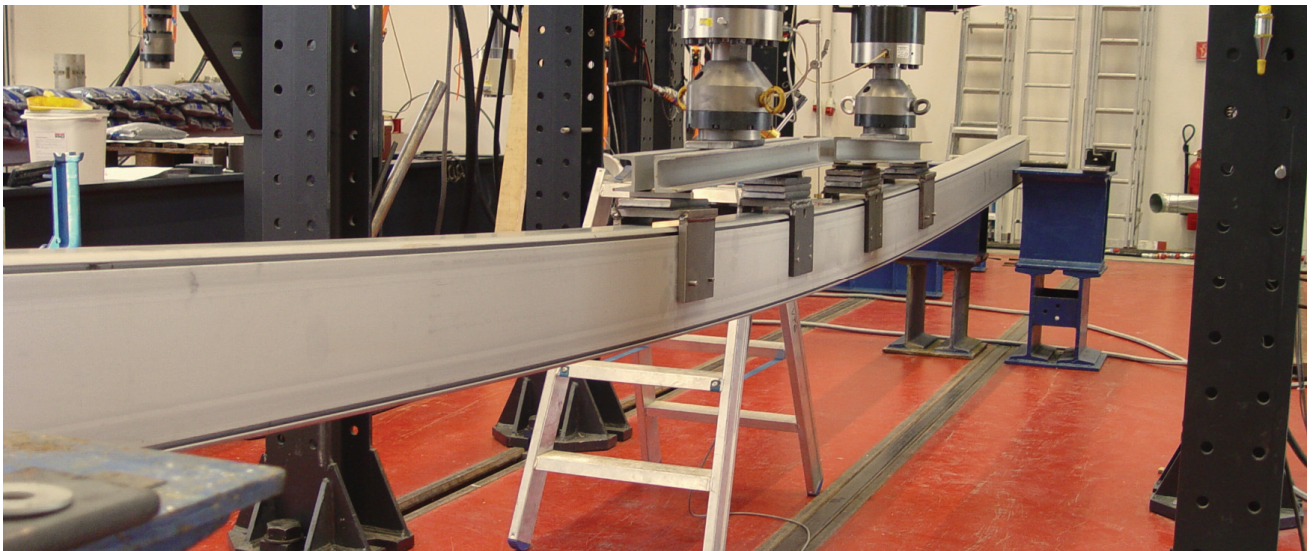


Abbildung A.82: Belastungsversuch am Alu-CFK-Hybridträger Typ 2

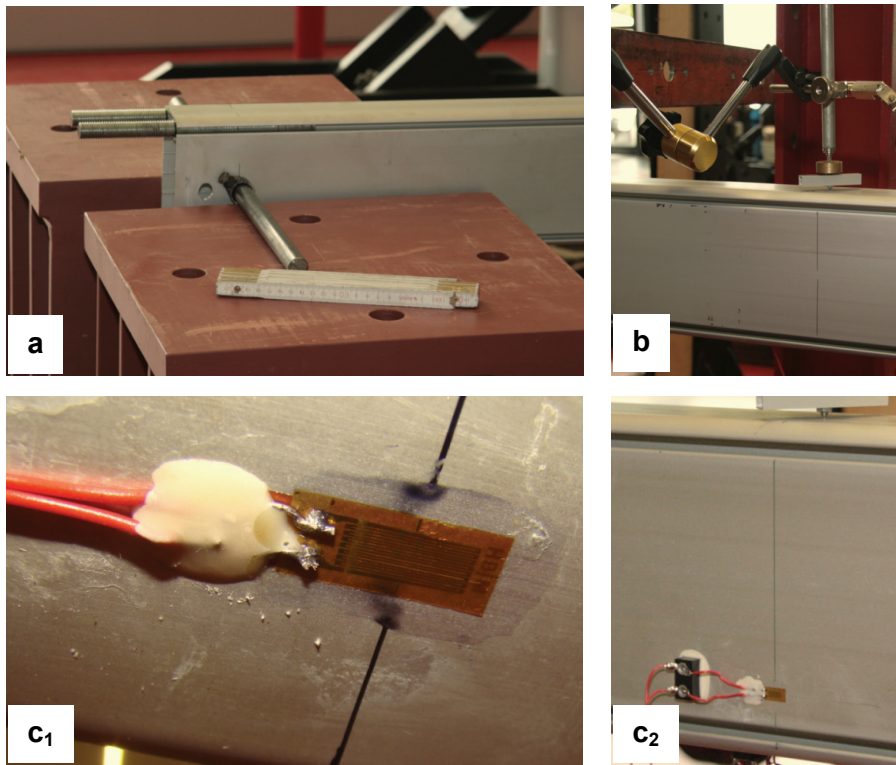


Abbildung A.83: Ausgewählte Details des Belastungsversuches; a: Endauflager, gelenkig und längsverschieblich; b: induktiver Wegaufnehmer in Trägermitte; c: Dehnungsmessung in Trägermitte c₁: am Untergurt; c₂: im Steg

Versuche an Biegeträgern mit und ohne CFK-Lamelle erlauben einen Vergleich des Tragverhaltens von herkömmlichen Biegeträgern aus Aluminium und den verstärkten Alu-CFK-Hybridelementträgern untereinander. Besonders im plastischen Bereich des Tragverhaltens können signifikante Unterschiede im Last-Verformungs-Verhalten zwischen unverstärkten und verstärkten Trägern festgestellt werden.

Bei der numerischen Analyse stellen die Grundlagenversuche zur Ermittlung der Materialeigenschaften von den im Wesentlichen verwendeten Werkstoffen, Aluminium, CFK und als Klebstoff PU2, eine wichtige Stütze zur Anwendung möglichst realistischer Materialmodelle dar. Diese sind:

- Aluminium: bilinear isotrop,
 - $E_1 = 70.000 \text{ N/mm}^2$; $\mu = 0,33$; $f_y = 250 \text{ N/mm}^2$; $E_2 = 500 \text{ N/mm}^2$;
 $\alpha_T = 23 \times 10^{-6}/\text{K}$,
- CFK-Lamelle: orthotrop elastisch,
 - $E_{||} = 140.000 \dots 160.000 \text{ N/mm}^2$; $E_{\perp} = 10.000 \text{ N/mm}^2$,
 - $G_{\perp||} = 5.400 \text{ N/mm}^2$; $G_{\perp\perp} = 5.800 \text{ N/mm}^2$,
 - $\mu_{\perp||} = 0,12$; $\mu_{\perp\perp} = 0,3$
 - $\alpha_{T||} = 0,2 \times 10^{-6}/\text{K}$; $\alpha_{T\perp} = 30 \times 10^{-6}/\text{K}$,
- Klebstoff PU2: elastisch isotrop,
 - $E = 120 \text{ N/mm}^2$; $\mu = 0,42$; $\alpha_T = 230 \times 10^{-6}/\text{K}$.

Experimentelle und numerische Untersuchungen des Gesamttragverhaltens

Einfeldträger Hybridelement Typ 1

In den Biegeträgeruntersuchungen am Hybridelement des Typs 1 wird der Einfluss unterschiedlicher Parameter der CFK-Lamellen untersucht. Der E-Modul der CFK-Lamellen in Lamellenlängsrichtung beträgt:

- $E_{1||} = 140.000 \text{ N/mm}^2$
- $E_{2||} = 160.000 \text{ N/mm}^2$.

Die geometrischen Abmessungen der CFK-Lamelle werden nicht variiert.

Der Einfluss der Dehnsteifigkeit der CFK-Lamellen lässt sich in experimentellen und numerischen Untersuchungen sehr gut erkennen. Experimentelle Untersuchungen an Hybridträgern mit den niedrmoduligen CFK-Lamellen zeigen eine verringerte elastische Grenztragfähigkeit auf.

Das Moment-Verformungs-Verhalten von Alu-CFK-Hybridträgern ist in Abhängigkeit verschiedener Parameter in den Diagrammen von Abbildung A.84 bis Abbildung A.86 jeweils linksseitig dargestellt. Die während des Belastungsversuches ermittelten Längsdehnungen an der Unterseite des Trägers und im Stegbereich bei 4/5 der Trägerhöhe sind jeweils auf der rechten Seite dargestellt.

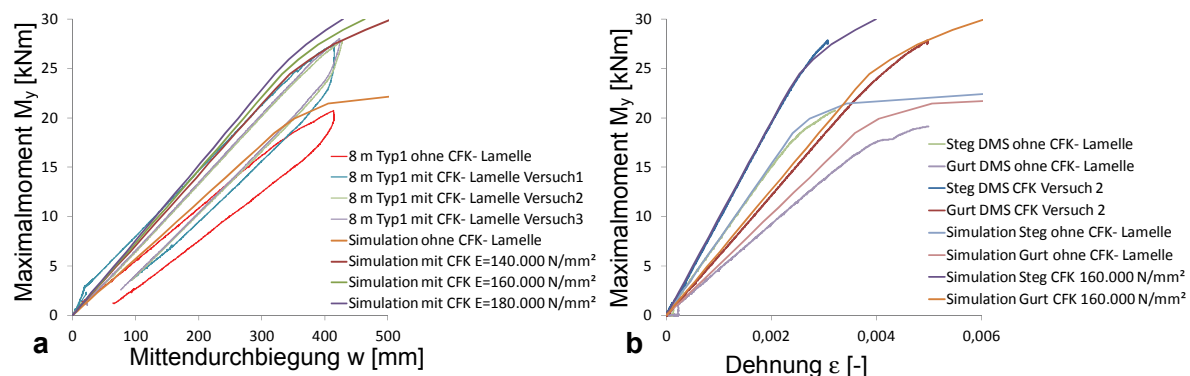


Abbildung A.84: a: Belastungs-Verformungsdiagramm 8 m Biegebalken Typ 1; b: Dehnung an Trägerunterseite und im Steg bei 4/5 Trägerhöhe

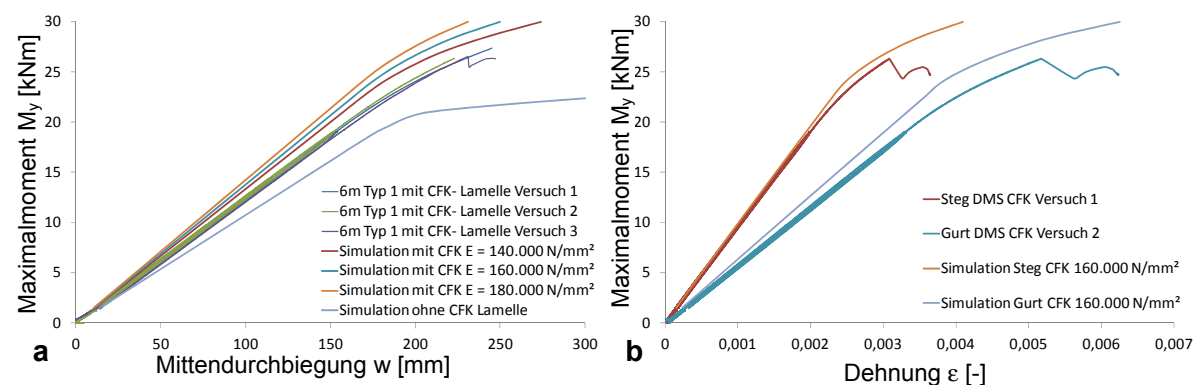


Abbildung A.85: a: Belastungs-Verformungsdiagramm 6 m Biegebalken Typ 1 b: Dehnung an Trägerunterseite und im Steg bei 4/5 Trägerhöhe

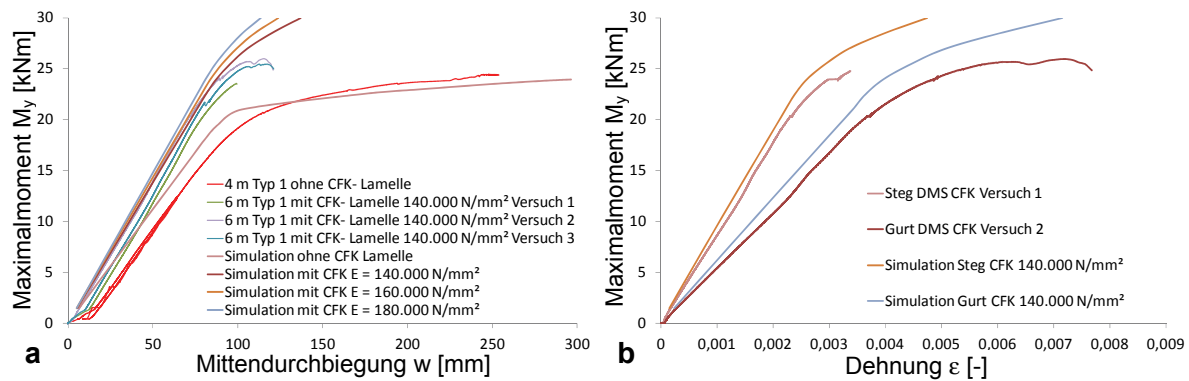


Abbildung A.86 a: Belastungs-Verformungsdiagramm 4 m Biegebalken Typ 1 b: Dehnung an Trägerunterseite und im Steg bei 4/5 Trägerhöhe

Die CFK-Lamelle bewirkt eine elastisch-plastische Tragreaktion, die zwischen der eines Biegeträgers mit ideal plastischen bzw. ideal elastischen Werkstoffverhalten liegt. Mit Erreichen der Plastizierungsgrenze des duktilen Werkstoffs Aluminium ändert sich das Lastreaktionsverhalten des Hybridträgers von rein elastisch in Richtung eines teilweise plastischen Lastreaktionsverhaltens. Die Steifigkeit des Hybridträgers ist dabei, verglichen mit der Steifigkeit eines reinen Aluminiumträgers, wesentlich höher.

Zur Abschätzung des Temperatureinflusses auf das Tragverhalten von Alu-CFK-Hybridelementen werden Biegeträger vom Typ 1 mit der Länge $L = 6$ m und der Belastungskonfiguration nach Abbildung A.77 bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen hinsichtlich des Tragverhaltens untersucht. Die betrachteten Temperaturbereiche werden definiert mit:

- $T_1 = +80$ °C,
- $T_2 = -10$ °C.

Die Temperatur wird unmittelbar vor dem Belastungsversuch auf den Träger gleichförmig aufgebracht. Anschließend wird der Träger mechanisch hinsichtlich seines Last-Verformungs-Verhaltens untersucht.

Numerische Untersuchungen belegen, dass die Drucksteifigkeit der CFK-Lamelle von der Steifigkeit der Matrix innerhalb der CFK-Lamelle abhängig ist. Die Zugsteifigkeit der CFK-Lamelle ist weitgehend von der Steifigkeit der längsgerichteten Kohlenstofffasern und dem Faseranteil abhängig. Der Einfluss der Matrixsteifigkeit ist aufgrund des hohen Steifigkeitsquotienten zwischen Kohlenstofffasern und Kunststoffmatrix relativ gering. Damit muss in der numerischen Simulation die Drucksteifigkeit einer CFK-Lamelle von der Zugsteifigkeit entkoppelt betrachtet werden. In den numerischen Betrachtungen wird die Zugsteifigkeit der CFK-Lamelle für den betrachteten Temperaturbereich als nahezu temperaturunabhängig angenommen, die Drucksteifigkeit wird dagegen weitgehend temperaturabhängig definiert. Die temperaturabhängige Steifigkeit für die Modellierung der CFK-Lamelle ist in Abbildung A.87 dargestellt. Die Streckgrenze des Aluminiums wird ebenfalls temperaturabhängig modelliert.

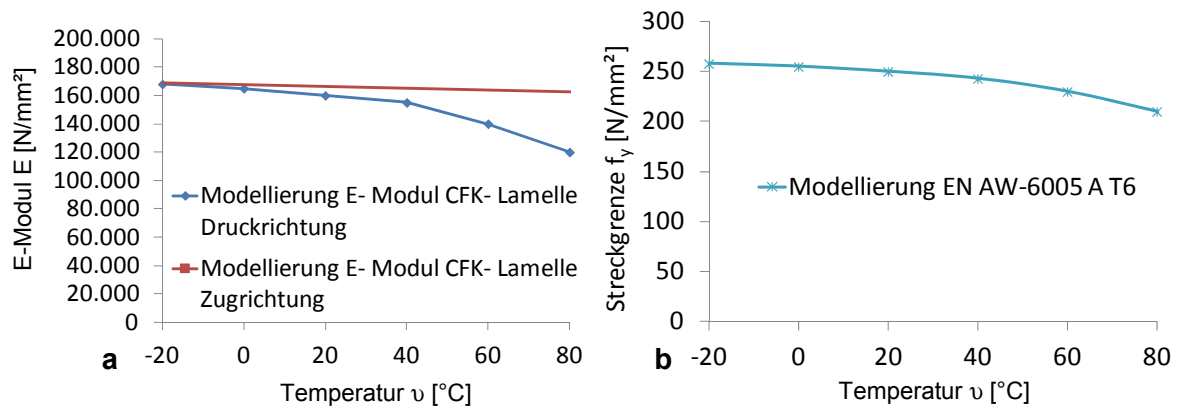


Abbildung A.87: Modellierung von temperaturabhängigen Materialkennwerten; a: $E_{II,CFK}$ in Abhängigkeit der Beanspruchungsrichtung; b: Streckgrenze f_y des modellierten Aluminiumwerkstoffs

Die Ergebnisse der Belastungsversuche für unterschiedliche Temperaturen sind in Abbildung A.88 dargestellt. Bei niedrigen Temperaturen ist eine Steigerung der Biegetragfähigkeit des Alu-CFK-Hybridträgers nachweisbar. Das Versagen des Hybridträgers wird initiiert durch ein Versagen der CFK-Lamelle infolge Druckbeanspruchung. Das deckt sich auch mit den Betrachtungen für CFK-Lamellen unter Druckbeanspruchung bei verschiedenen Temperaturen, die in Abschnitt 4.1.3 auf Seite 103 ff. dargestellt sind.

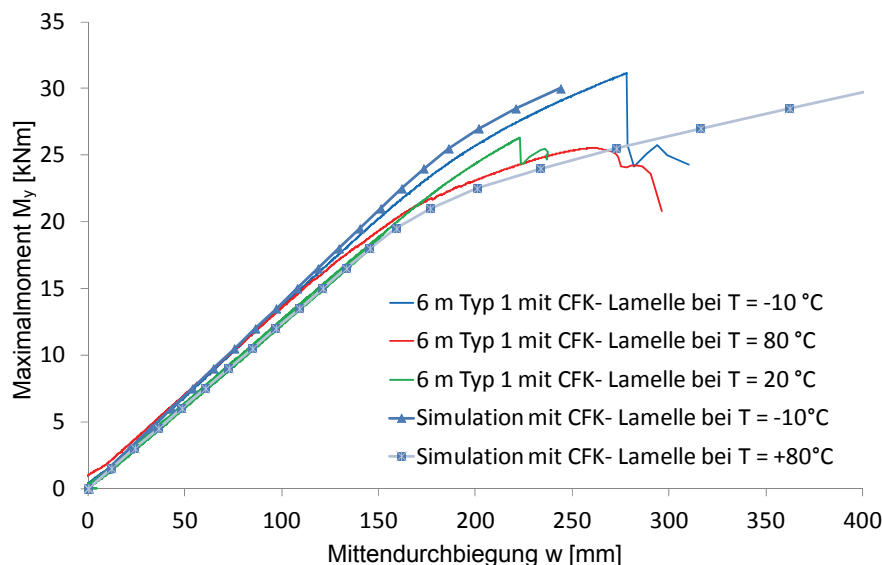


Abbildung A.88: Tragverhalten des Alu-CFK-Hybridträgers vom Typ 1 unter verschiedenen Temperaturen

Bei hohen Temperaturen nimmt die Steifigkeit der CFK-Lamelle ab. Das führt zu einem früheren Plastizieren des Trägers als bei geringeren Temperaturen. Die Bruchlast des Trägers nimmt mit steigender Temperatur ebenfalls geringfügig ab. Das kann mit der geringeren Druckfestigkeit der CFK-Lamelle bei hohen Temperaturen erklärt werden.

Einfeldträger Hybridelement Typ 2

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen an Alu-CFK-Hybridprofilen des Typs 2 mit dem Querschnitt nach Abbildung 4.41b werden Tragfähigkeitsuntersuchungen an Biegebalcken mit $L = 6$ m durchgeführt. Die Auflagersituation und Positionierung der Lasteinleitung ist in Abbildung A.77 dargestellt.

Abbildung A.89a zeigt das Verhältnis von Mittelmoment zu Mitteldurchbiegung während des Belastungsversuchs und für die numerischen Analysen. Die experimentell ermittelten und numerisch berechneten Längsdehnungen an der Unterseite des Trägers und im Stegbe-
reich bei 4/5 der Trägerhöhe sind in Abbildung A.89b dargestellt. Der Vergleich zwischen numerisch berechneten und experimentell ermittelten Durchbiegungen zeigt eine gute Übereinstimmung bezüglich der Durchbiegungen und der punktuell bestimmten Dehnungen.

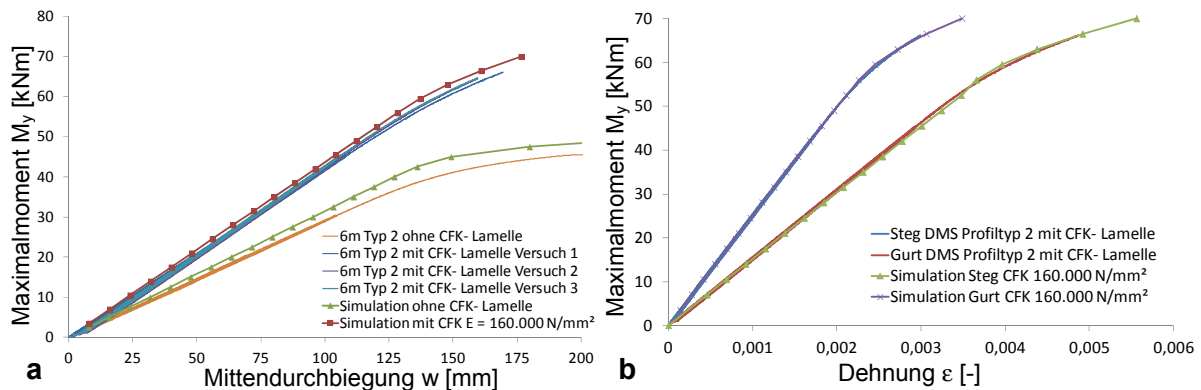


Abbildung A.89: Ergebnisse der Biegeträgerprüfung vom Typ 2; a: Mittelmoment-Mitteldurchbiegung bei Biegebeanspruchung; b: mit DMS gemessene Dehnungen am Untergurt und bei 4/5 Trägerhöhe

Der Belastungsversuch wird ebenfalls für einen Aluminiumträger des gleichen Typs ohne CFK-Lamellen durchgeführt. Das hier ermittelte maximale Tragmoment beträgt etwa 70 % der Tragfähigkeit eines unverstärkten Trägers. Die durch Plastizierungen auftretenden Durchbiegungen sind bei unverstärkten Aluminiumträgern wesentlich größer als bei den CFK-Lamellen-verstärkten Aluminiumträgern. Das ist auf ein Fehlen der elastisch bleibenden Komponente des CFK im unverstärkten Aluminiumträger zurückzuführen.

Ergebnisse der Biegeträgeruntersuchungen

Bei großen Trägerlängen kann die Steifigkeit und Beanspruchbarkeit des Hybridelementes mit der Theorie des ebenen Querschnitts berechnet werden. Die Steifigkeit und Biegetragfähigkeit eines Alu-CFK-Hybridelementes ist dabei im Wesentlichen abhängig von der Steifigkeit der verwendeten Ausgangswerkstoffe. Das Tragverhalten eines Alu-CFK-Hybridelementes unter Biegebeanspruchung untergliedert sich in 2 qualitativ unterschiedliche Bereiche. Bei elastischer Reaktion des Hybridelementes kann der Spannungsverlauf über den Querschnitt durch Multiplikation von elastischer Dehnung und E-Modul annähernd ermittelt werden. Im plastischen Beanspruchungsbereich ist ein zweigeteiltes Werkstoffreaktionsverhalten in Aluminium und CFK-Lamelle zu beobachten. Das Aluminium reagiert ausgeprägt plastisch mit einer geringen Verfestigungsrate. Die CFK-Lamelle hingegen bleibt bis zum Bruch weitgehend elastisch. Das Lastreaktionsverhalten eines Alu-CFK-Hybridelementes liegt damit zwischen einem elastisch und einem plastisch reagierenden Tragelement. Die plastischen Verformungszuwächse des Hybridelementes sind damit weit geringer, als sie bei einem Träger mit ideal plastisch reagierendem Werkstoff zu beobachten sind.

Numerische Analyse herausgelöster Systembestandteile

Beanspruchungen in der CFK-Lamelle

Das mechanische Verhalten der CFK-Lamelle hat einen wesentlichen Anteil am Gesamttragverhalten eines Alu-CFK-Hybridelementes. Daher ist eine Betrachtung der mechani-

schen Randbedingungen, die innerhalb der CFK-Lamelle bei verschiedenen Beanspruchungen vorliegen, sinnvoll, um das Tragverhalten von Alu-CFK-Hybridelementen zu beurteilen.

An einem Einfeldträger des Hybridprofiltyps 1 mit der Länge $L = 6\text{ m}$ und einer gleichmäßigen Linienlast wird die mechanische Beanspruchung der CFK-Lamelle unter verschiedenen Randbedingungen untersucht. Das statische System des untersuchten Hybridelements ist in Abbildung A.90 dargestellt.

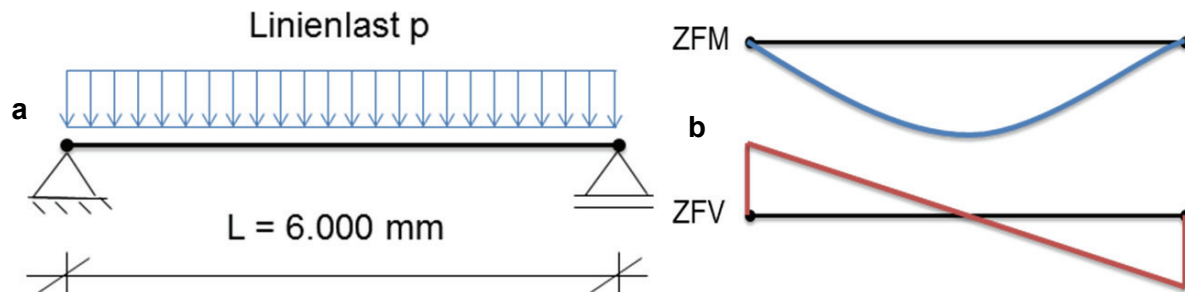


Abbildung A.90: a: Statisches System eines betrachteten Einfeldträgers unter konstanter Linienlast; b: resultierende Schnittkraftverteilung

Wesentliche Randbedingungen der numerischen Untersuchung sind:

- kombinierte Beanspruchung aus Linienlast p und unterschiedlichen Temperaturen,
 - Beanspruchung aus Linienlast von $p = 7,5\text{ kN/m}$; Feldmoment $M_y = 60\text{ kNm}$ bei Raumtemperatur,
 - Kombination aus Linienlast und Temperatur $\vartheta = -20\text{ °C}$ mit Temperaturabhängigkeit der Materialkennwerte,
 - Kombination aus Linienlast und Temperatur $\vartheta = +80\text{ °C}$ mit Temperaturabhängigkeit der Materialkennwerte.

Die Materialkennwerte werden in dieser numerischen Analyse temperaturabhängig betrachtet. Damit kann der Einfluss der Temperatureffekte detailliert analysiert werden.

Parallel dazu kann die Normalspannung in der CFK-Lamelle mittels einfacher Ingenieurmodelle analysiert werden. Analog zu den numerischen Berechnungen lässt sich die Normalspannung innerhalb der CFK-Lamelle mit den in Abschnitt 4.1.2 gezeigten ingenieurmäßigen Betrachtungen ermitteln.

Ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Modellvarianten erlaubt die Qualifizierung der verschiedenen Modelltypen hinsichtlich ihrer Eignung zur Beschreibung der mechanischen Abläufe innerhalb des Hybridelementes bei unterschiedlichen Beanspruchungszuständen. Die Überlagerung von Temperaturbeanspruchungen und mechanischen Beanspruchungen ergibt unterschiedliche Beanspruchungszustände der CFK-Lamelle bei, global gesehen, gleicher mechanischer Beanspruchung des Hybridträgers. Dabei ist zwischen elastischen und plastischen Tragzuständen zu unterscheiden.

Abbildung A.91 zeigt die berechnete Normalspannung der CFK-Lamelle, aufgetragen über die Trägerlänge bei unterschiedlichen Beanspruchungszuständen. Die unterschiedlichen Berechnungsmodelle zeigen erwartungsgemäß sowohl qualitative als auch quantitative Unterschiede für die Berechnung der Normalspannung innerhalb der CFK-Lamelle.

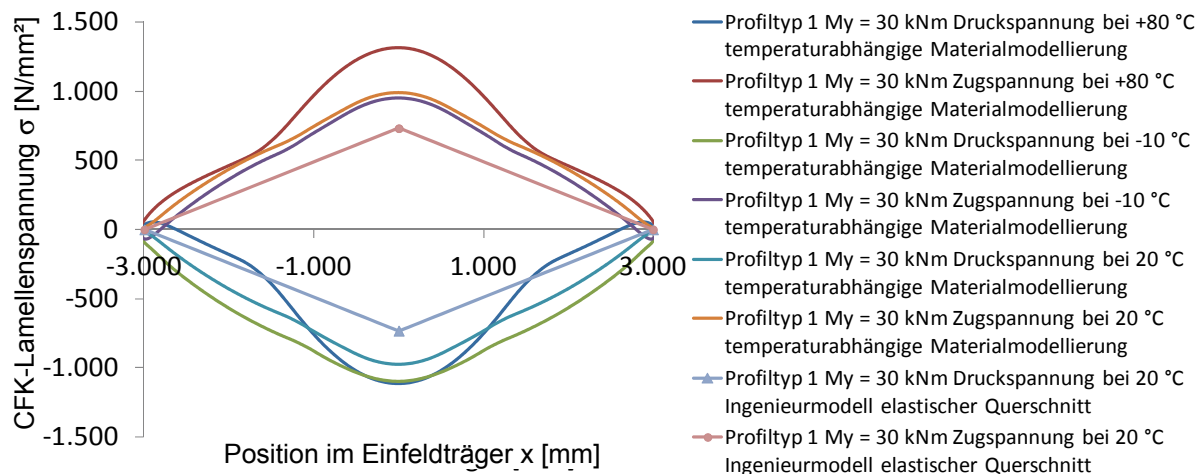


Abbildung A.91: Ergebnisse der FEM-Analyse von Spannungen in der CFK-Lamelle für $\max M_y = 30$ kNm bei unterschiedlichen Temperaturen; Einfeldträger $L = 8$ m Alu-CFK-Hybridprofil Typ 2; Aluminium: EN AW-6005 A T6

Bei erhöhten Temperaturen treten geringere Druckspannungen in der CFK-Lamelle im elastisch beanspruchten Trägerbereich auf. Das ist mit dem Vorspannungszustand der CFK-Lamelle infolge unterschiedlicher Temperaturdehnungen zu erklären. Im plastischen Traglastbereich ist ein hoher Normalspannungsgradient innerhalb der CFK-Lamelle zu beobachten, die als elastisch wirkender Anteil des Hybridelementes einen hohen Spannungszuwachs erfährt. Bei sinkender Temperatur erfolgt ein leichter Anstieg der Druckspannungen in der CFK-Lamelle. Diesem Anstieg der Druckspannungen innerhalb der CFK-Lamelle bei niedrigen Temperaturen steht ein starker Anstieg der Druckfestigkeit von CFK-Lamellen infolge der erhöhten Matrixsteifigkeit gegenüber. Damit kann auch die gesteigerte Biegefestigkeit der Hybridträger bei niedrigen Temperaturen erklärt werden. Dieser Effekt wird in der Literatur beschrieben (Schürmann, 2007) und kann in eigenen numerischen Untersuchungen belegt werden. Die Biegefestigkeit der Hybridträger steigt bei niedrigen Temperaturen an. Diese Erkenntnis wird auch gestützt von Ergebnissen aus Biegeträgerversuchen am Alu-CFK-Hybridprofil Typ 1. Bei niedriger Temperatur (-10 °C) können höhere Biegemomente vom Hybridträger aufgenommen werden als bei Raumtemperatur, wie Vergleichsuntersuchungen in Abbildung A.88 zeigen.

Bei Überschreiten der elastischen Tragfähigkeit führen Plastizierungen des Aluminiums zu einem teilweisen Herausarbeiten des temperaturinduzierten Eigenspannungszustandes. Bei einer vollständigen Plastizierung des Querschnitts werden alle Eigenspannungen infolge plastischer Dehnung aus dem Querschnitt herausgezogen und Temperatureffekte üben nur noch Einflüsse auf die Steifigkeit der Werkstoffe aus.

Die auftretenden maximalen Druckbeanspruchungen in der CFK-Lamelle sind für unterschiedliche Modellparameter in Abhängigkeit der Belastung in Abbildung A.92 dargestellt.

Die Anwendung temperaturabhängiger Materialkennwerte für die verwendeten Werkstoffe führt zur Berechnung von quantitativ unterschiedlichen Beanspruchungen für die CFK-Lamelle. Dabei gilt der Grundsatz, dass in Belastungsrichtung steifere Werkstoffe innerhalb des Hybridquerschnitts größere Beanspruchungen erfahren als weichere Werkstoffe. Eine CFK-Lamelle, die bei hohen Temperaturen Steifigkeiten abbaut, nimmt somit geringere Beanspruchungen auf als bei niedrigen Temperaturen, bei denen höhere Steifigkeiten vorliegen.

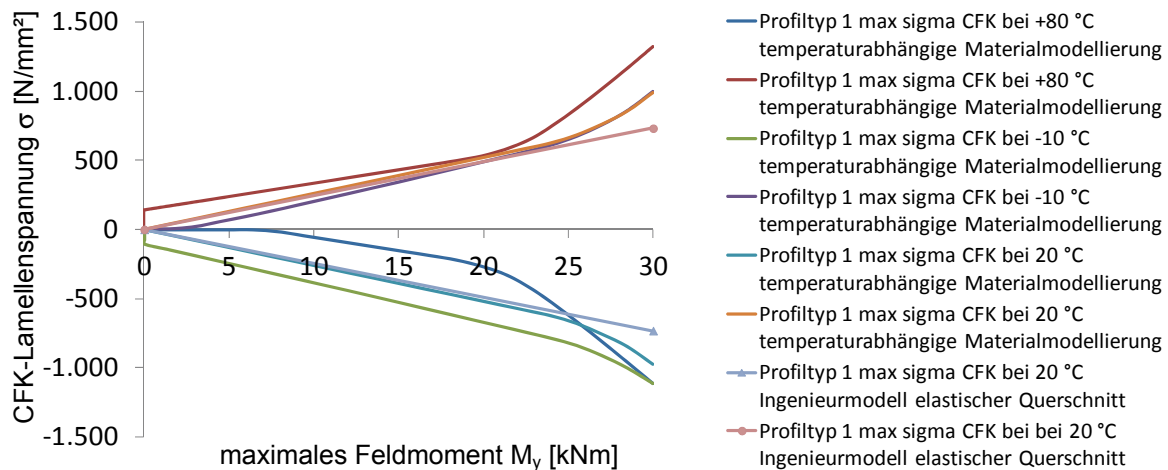


Abbildung A.92: Ergebnisse der FEM-Analyse maximaler Spannungen in der CFK-Lamelle in Abhängigkeit der Biegebeanspruchung bei unterschiedlichen Modellparametern

Die ingenieurmäßige Berechnung der auftretenden Maximalbeanspruchung innerhalb der CFK-Lamelle zeigt dabei bei elastischer Beanspruchung des Hybridelementes gute Übereinstimmungen mit aus FEM-Berechnungen ermittelten Spannungen bei Vernachlässigung des Temperatureinflusses. Bei Überschreitung der elastischen Traglast ist dieses ingenieurmäßige Modell jedoch nicht mehr anwendbar, was durch die quantitativen Unterschiede zwischen Ingenieurmodell und FEM-Modell sichtbar wird.

Die Kriecheigenschaften des Klebstoffs führen bei dauerhafter Schubbeanspruchung der Klebfuge zu einer reduzierten CFK-Lamellenbeanspruchung. Daher stellen die in Abbildung A.91 und Abbildung A.92 dargestellten Beanspruchungszustände nur eine Momentaufnahme dar, in der die Beanspruchung hauptsächlich durch die Steifigkeit des betreffenden Werkstoffs und seiner Position im Hybridquerschnitt bestimmt wird. Die Betrachtung der Beanspruchungszustände innerhalb der CFK-Lamelle bei Dauerbeanspruchung des Hybridelementes wird in Abschnitt A.9.6 geführt.

Beanspruchungen in der Klebfuge

Die Betrachtung der Schubspannung in der Klebfuge am numerischen Modell eines einfachen Biegeträgers, wie in Abbildung A.90 dargestellt, zeigt einen sehr gleichmäßigen Schubspannungsverlauf mit niedrigen Maximalwerten.

Nachfolgend werden die Ergebnisse verschiedener numerischer Analysen von unterschiedlich biegebeanspruchten Einfeldträgern dargestellt. Der Querschnitt entspricht den Hybridprofilen von Typ 1 und 2. Die Belastung wird über eine gleichförmige Linienlast in den Träger eingetragen. Die Lastparameter gliedern sich auf in:

- Hybridelement Typ 1,
 - Länge $L = 6.000 \text{ mm}$,
 - $p = 4,4 \text{ kN/m}$ für Maximalmoment $M_y = 20 \text{ kNm}$ (elastischer Fall),
 - $p = 6,6 \text{ kN/m}$ für Maximalmoment $M_y = 30 \text{ kNm}$ (plastischer Fall),
- Hybridelement Typ 2,
 - Länge $L = 6.000 \text{ mm}$,
 - $p = 11,1 \text{ kN/m}$ für Maximalmoment $M_y = 50 \text{ kNm}$ (elastischer Fall),
 - $p = 15,5 \text{ kN/m}$ für Maximalmoment $M_y = 70 \text{ kNm}$ (plastischer Fall).

Die Schubspannung innerhalb der Klebfuge wird mit unterschiedlichen ingenieurmäßigen und numerischen Modellen berechnet.

Die Auswertung der auftretenden Schubspannungen in der Klebfuge zeigt, dass die Kraftumlagerung vom Aluminiumquerschnitt in die CFK-Lamelle über die Gesamtlänge des Trägers verteilt erfolgt. Eine Konzentration der Kraftumlagerungen ist im querkraftbeanspruchten auflagnahen Bereich des Trägers zu beobachten. Der Schubspannungsverlauf, über die Trägerlänge aufgetragen, ist in Abbildung A.93 für Hybridelement Typ 1 und für Hybridelement Typ 2 in Abbildung A.94 dargestellt. Die ingenieurmäßigen Berechnungsformeln zur Ermittlung der Schubbeanspruchung werden in Abschnitt 4.1.2 hergeleitet.

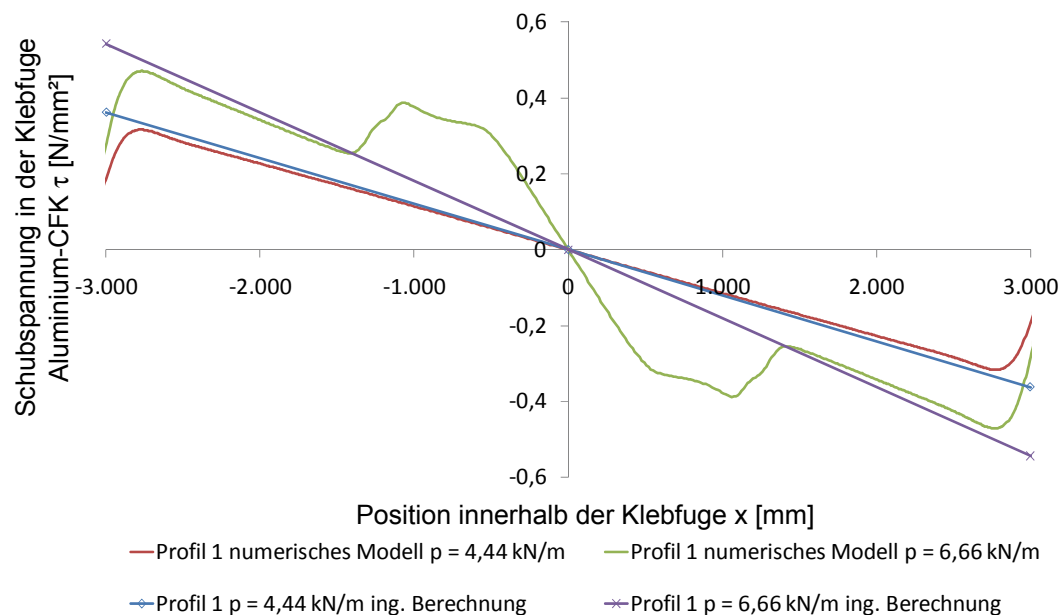


Abbildung A.93: Ergebnisse der FEM-Analyse von Schubspannungen $\tau_{\text{längs}}$ in der Klebfuge [N/mm²] aufgetragen über die Trägerlänge bei unterschiedlichen Beanspruchungszuständen; Typ 1

Ein Vergleich zwischen numerischen und ingenieurmäßig ermittelten Schubspannungen ergibt bei elastischer Trägerbeanspruchung sehr gute Übereinstimmungen. Die Unterschiede im Auflagerbereich zwischen Ingenieurmodell und FEM-Modell erklären sich durch lokale Lastumlagerungseffekte, die im Ingenieurmodell nicht berücksichtigt werden können. Bei plastischer Beanspruchung entstehen große Unterschiede zwischen den numerischen und ingenieurmäßigen Modellen, da unterschiedliche Materialeigenschaften, elastisch und plastisch, zu einer überproportionalen Lastzunahme in der elastisch reagierenden CFK-Lamelle führen. In der Folge sind für plastisch beanspruchte Bereiche des Hybridelementes die numerisch ermittelten Schubspannungen in der Klebfuge höher, als sie nach der ingenieurmäßigen Theorie des ebenen vollständig elastischen Querschnitts berechnet werden. Dieser Sachverhalt deckt sich auch mit den Berechnungen der CFK-Lamellen-Längsspannung, die auf Seite LXXXVII ff. vorgestellt werden.

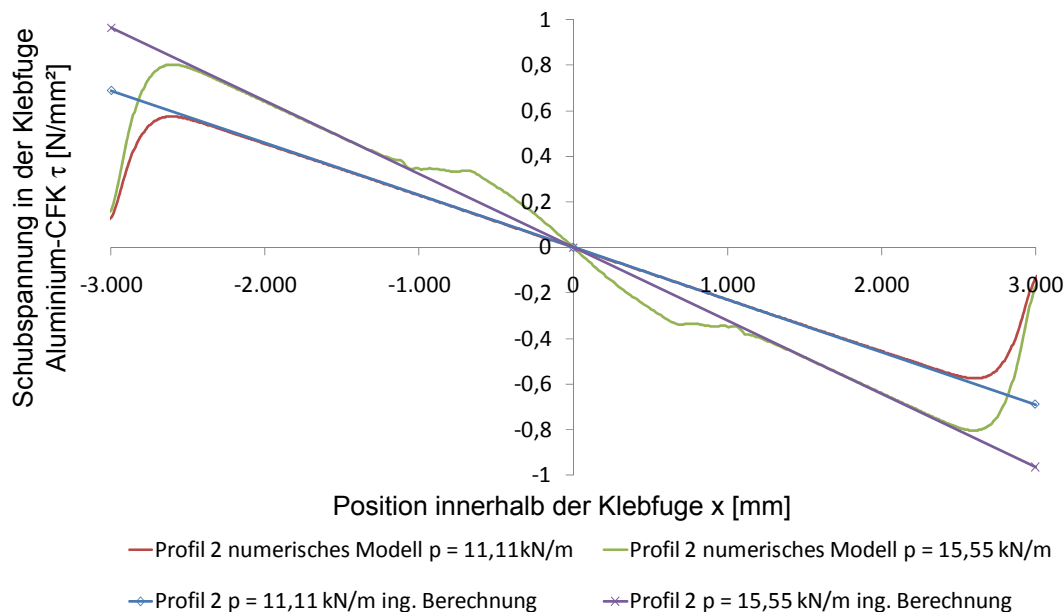


Abbildung A.94: Ergebnisse der FEM-Analyse von Schubspannungen $\tau_{\text{längs}}$ in der Klebfuge [N/mm²] aufgetragen über die Trägerlänge bei unterschiedlichen Beanspruchungszuständen; Typ 2

Die in einem gleichförmig belasteten Einfeldträger auftretenden Klebfugenbeanspruchungen sind aufgrund der geringen Querkraftbeanspruchungen nicht systemrelevant. Die Schubbeanspruchung innerhalb der Klebfuge Aluminium – CFK ist insbesondere bei Kragträgern mit hohen Momentengradienten von systemrelevanter Bedeutung. Numerische Untersuchungen dazu sind auf Seite 141 ff. dargestellt.

A.9.6 Dauerhaftigkeitsuntersuchungen an Alu-CFK-Hybridelementen

Dauerschwingversuch

In einem Dauerschwingversuch wird ein Biegebalken mit $L = 6 \text{ m}$ und dem in Abbildung 4.41b dargestellten Querschnitt in einer Belastungskonfiguration, wie in Abbildung A.77 gezeigt, mit 20.000 Lastwechseln beansprucht. Die Belastung wird als Schwellenbeanspruchung kraftgesteuert auf den Träger aufgegeben. Die Belastung erfolgte bei Raumtemperatur in folgender Konfiguration:

- obere Belastung $M_o = 12,5 \text{ kNm}$,
- untere Belastung $M_u = 0,5 \text{ kNm}$,
- Periodendauer $\Delta t = 25 \text{ s}$.

Das Ziel des Lastwechselversuches ist eine Abschätzung hinsichtlich auftretender Schädigungen im Bauteil infolge auftretender Gebrauchslasten. Aufgrund der Höhe der eingesetzten Spitzenlast ($F_{\text{Dauerlast}} > 0,5 F_d$) sind etwa 98% der max. zu berücksichtigenden charakteristischen Windbelastung (Auftrittswahrscheinlichkeit 2% in 50 Jahren) abgedeckt. Während des Schwingversuches wird kontinuierlich die sich einstellende Maximaldurchbiegung bei jeder Lastperiode gemessen und zusätzlich mittels DMS Längsspannungen im Aluminium ermittelt. Die Auswertung der kontinuierlichen Messungen ist in Abbildung A.95 dargestellt. Die anschließend von den Dehnungsmessstreifen gemessene Restdehnung ist bis auf den Genauigkeitsbereich der DMS identisch mit der Dehnung, die vor Belastungsbeginn ermittelt wurde.

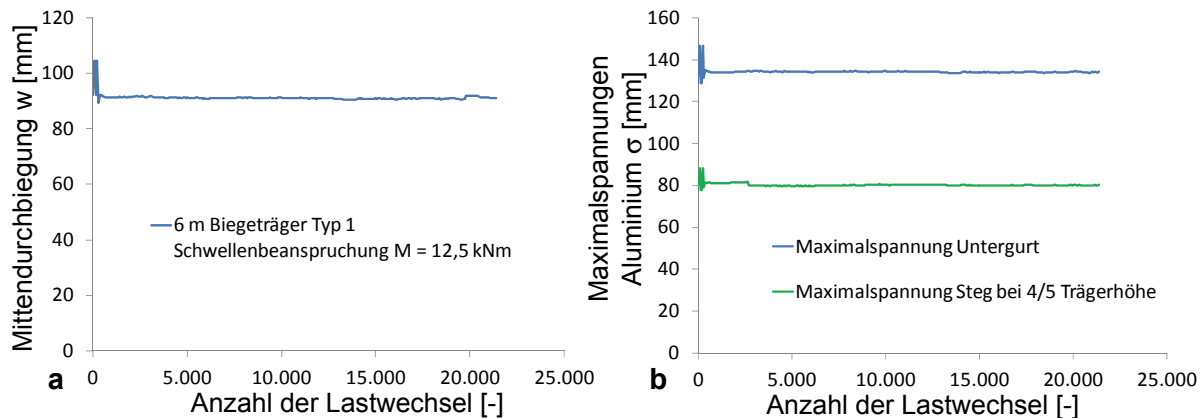


Abbildung A.95: Verhalten des Alu-CFK-Hybridträgers während des Schwingversuches
a: Maximaldurchbiegung bei oberer Belastungsschwelle; b: aus den DMS berechnete Maximalspannungen

Nach Beendigung des Dauerschwingversuches wird ein Biegeversuch durchgeführt, um die Resttragfähigkeit des Trägers zu ermitteln. Der Vergleich des Last-Verformungsverhaltens eines vorbelasteten und eines nicht vorbelasteten Trägers sind in Abbildung A.96 dargestellt.

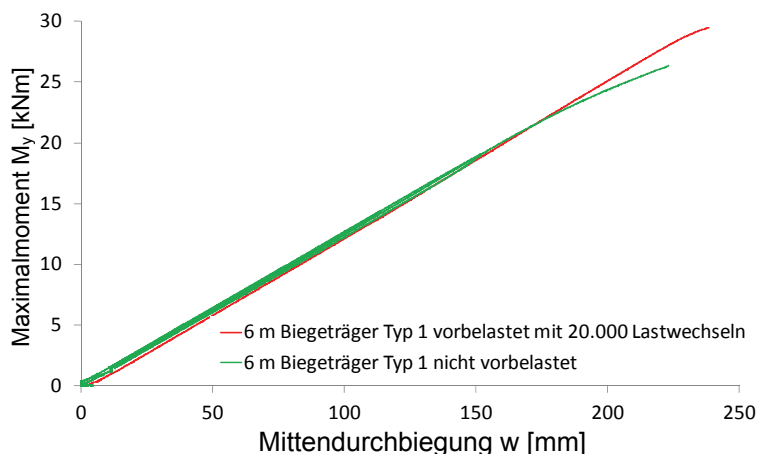


Abbildung A.96: Tragverhalten des Alu-CFK-Hybridträgers nach Beendigung des Schwingversuchs

Die Steifigkeit und Tragfähigkeit des Hybridbiegeträgers wird durch die zyklische Wechselbeanspruchung nicht negativ beeinträchtigt. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass die strukturellen Elemente des Hybridträgers durch die Wechselbeanspruchung offensichtlich keine Schädigung erfahren.

Statische Dauerbelastung

Zur Simulation einer langfristig wirkenden Beanspruchung an einem anwendungsrelevanten Bauteil wird ein Einfeldträger vom Typ 2 mit dem in Abbildung 4.41b dargestellten Querschnitt experimentell untersucht. Wesentliche Versuchsparameter dabei sind:

- Alu-CFK-Hybridträger Typ 2,
- Gesamtlänge $L = 8$ m (siehe Abbildung A.97),
- Belastung: $F = 2.550 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 25 \text{ kN}$; in Form von Stahlkies, ergibt eine konstante Linienlast mit $p = 3,125 \text{ kN/m}$,
- $M_{y,\text{mitte}} = 25 \text{ kNm} + 0,8 \text{ kNm}$ infolge Eigengewicht des Trägers.

Der belastete Alu-CFK-Hybridträger ist in Abbildung A.98 dargestellt.

Die Belastung wird über einen Zeitraum von $t = 18$ d aufrecht erhalten, anschließend wird der Träger entlastet.

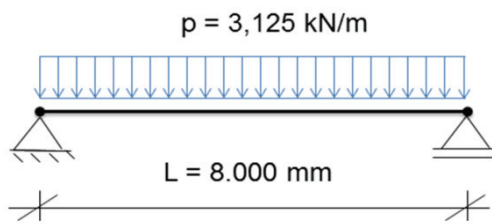


Abbildung A.97: Belastungsmodell für den Dauerlastversuch



Abbildung A.98: Linienförmig belasteter Alu-CFK-Hybridträger

Die Durchbiegung des Trägers in Feldmitte wird mittels eines induktiven Wegaufnehmers erfasst. In Trägermitte wird weiterhin ein DMS an der Trägerunterseite zur Erfassung der Dehnungen des Untergurts positioniert. Abbildung A.99 zeigt die Anordnung des induktiven Wegaufnehmers und des DMS in Feldmitte des Trägers.



Abbildung A.99: Induktiver Wegaufnehmer und DMS an der Trägerunterseite in Feldmitte des Alu-CFK-Hybridträgers

Experimentell und numerisch ermittelte Durchbiegungen bzw. Dehnungen in der Mitte des Biegeträgers sind in Abhängigkeit der Belastungsdauer in Abbildung A.100 dargestellt.

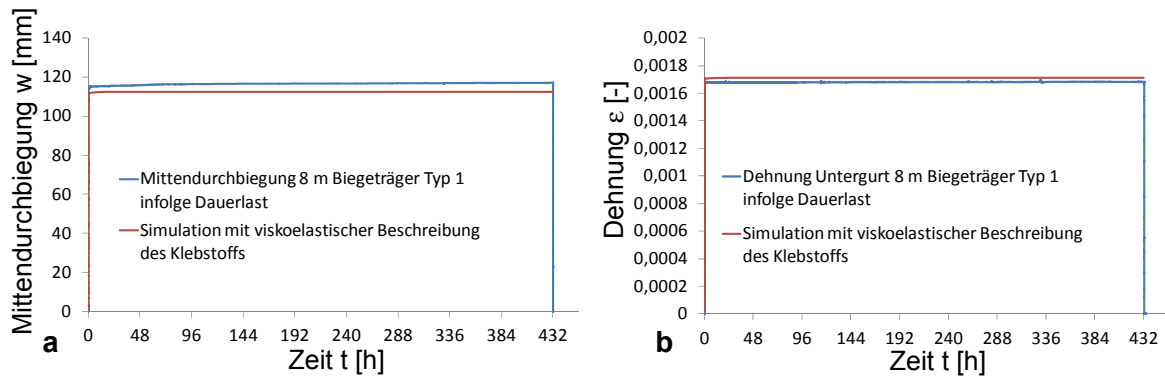


Abbildung A.100: Reaktion des Alu-CFK-Hybridträgers infolge Dauerbelastung $p = 3,125 \text{ kN/m}$; a: Mittendurchbiegung; b: Längsspannung im Aluminium

Die Auswertung der Durchbiegung über die Zeit zeigt eine praktisch gleichbleibende Verformung des Trägers über den gesamten Belastungszeitraum. Geringfügige Verformungsänderungen, die auf ein Kriechen des Klebstoffs hindeuten, können im ersten Drittel des Beanspruchungszeitraumes beobachtet werden. Im numerischen Modell, bei dem das Kriechen des Klebstoffs mit einem viskoelastischen Materialmodell abgebildet wird, kann der kriechinduzierte Verformungsanteil des Hybridelementes rechnerisch nachvollzogen werden. In der numerischen Berechnung wird ein kriechinduzierter Verformungsanteil ermittelt, der ca. 1 % der Gesamtverformung ausmacht.

Nach Entlastung des Trägers wird eine Restdehnung experimentell gemessen, die im Toleranzbereich der Messgenauigkeit des verwendeten Dehnungsmessstreifens liegt.

Der über die Trägerlänge aufgetragene Verlauf der Schubspannung zwischen Aluminium und CFK ist für unterschiedliche Berechnungsmodelle und Beanspruchungsdauern in Abbildung A.101 dargestellt.

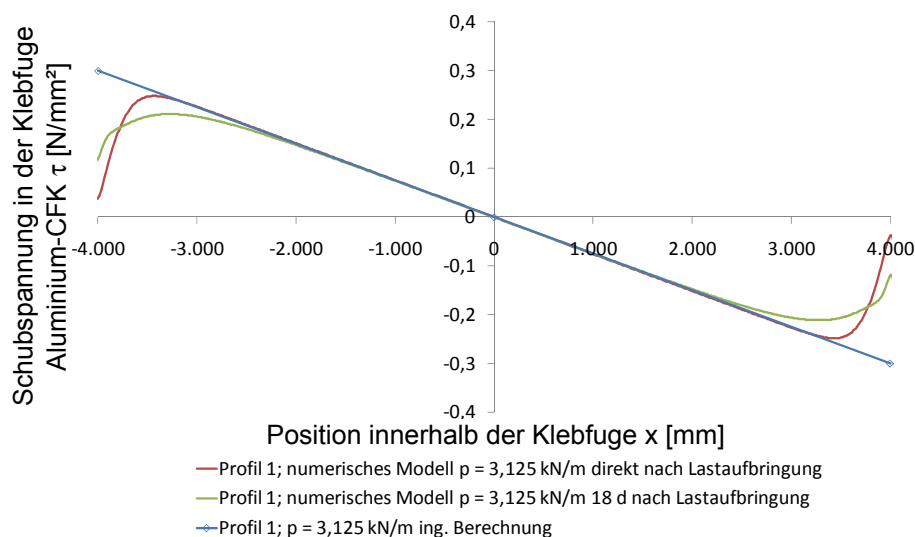


Abbildung A.101: Ergebnisse der FEM-Analyse von Schubspannungen $\tau_{\text{längs}}$ in der Klebfuge [N/mm²] aufgetragen über die Trägerlänge für unterschiedliche Berechnungsmodelle und unterschiedliche Zeitpunkte der Beanspruchung; Typ 2

Bei Belastungsbeginn ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der ingenieurmäßig nach Abschnitt 4.1.2 und der numerisch ermittelten Schubspannung feststellbar. Die maximalbeanspruchten Bereiche der Klebfuge bauen über den Zeitraum der Beanspruchung einen Teil der Schubspannung ab. Die Beanspruchung innerhalb der CFK-Lamelle sinkt dabei

leicht ab. Dieser Effekt ist prinzipiell vergleichbar mit den Schubspannungsumlagerungen, die an den Auszugsproben numerisch ermittelt werden können.

Der Effekt des Klebstoffkriechens unter Dauerbeanspruchung hat nur geringe Auswirkungen auf das Gesamttragverhalten des Alu-CFK-Hybridelementes. Das liegt vor allem an der geringen Schubbeanspruchung, die bei Dauerbelastung in der Klebfuge zu erwarten ist, aber auch an dem Sachverhalt, dass die auftretende Maximalbeanspruchung immer außerhalb von geometrischen oder strukturellen Kerben des Hybridelementes auftritt.

A.9.7 Herstellungsverfahren und Überwachungsmöglichkeiten

Die Herstellung von Alu-CFK-Hybridelementen ist bestimmt durch die gekammerte Anordnung der CFK-Lamelle im Aluminiumprofilquerschnitt. Das erfordert ein Herstellungsverfahren, bei dem in einem Arbeitsgang die CFK-Lamelle und der Klebstoff in die Kammer eingebracht werden. Anschließend härtet der Klebstoff aus, und die CFK-Lamelle ist strukturell mit dem Aluminiumprofil verbunden. Der so hergestellte Verbundträger weist dann die ihm zugeschriebenen Eigenschaften eines Alu-CFK-Hybridelementes auf. Der Produktionsvorgang des Einklebens der CFK-Lamelle in die Aluminiumhohlkammer erfolgt im Wesentlichen in drei Arbeitsschritten:

- Injektion des benötigten Klebstoffs in eine Seite der Hohlkammer,
- Verschließen der Kammeröffnung, an der die Injektion erfolgt ist,
- Einschieben der CFK-Lamelle in die Kammer von der Luftseite aus.

Der Klebstoff wird dabei mittels Förderungsanlage und kombinierten Dynamikmischaufsatz direkt vor der Injektion in die Kammer gemischt und luftfeinschlusfrei homogenisiert. Damit kann die Topfzeit des Klebstoffs optimal genutzt werden. Abbildung A.102 zeigt die verwendete Misch- und Dosieranlage für den 2K-Polyurethanklebstoff.



Abbildung A.102: Misch- und Dosiereinheit zur Herstellung eines homogenisierten 2K Polyurethanklebstoffs

Um eine Schädigung des Aluminiumprofils infolge eines zu hohen Drucks innerhalb der ungefüllten Aluminiumkammer auszuschließen, wird der Kammerinnendruck während des gesamten Produktionsablaufes gemessen und bei Überschreitung festgelegter Grenzwerte die Injektionsgeschwindigkeit des Klebstoffs bzw. die Vorschubgeschwindigkeit der CFK-Lamelle dynamisch angepasst. Damit kann immer im optimalen Arbeitsfenster mit optimalen Taktzeiten produziert werden. Das Befüllen der Aluminiumkammer mit Klebstoff sowie die Einrichtung zur Überwachung des Kammerinnendrucks sind in Abbildung A.103 dargestellt.

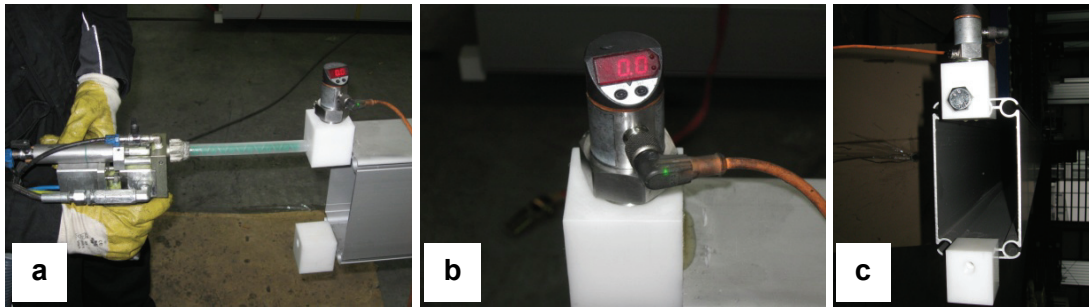


Abbildung A.103: a: Injektion des Klebstoffs in die Kammer; b: Kontrolle des Kammerdrucks in Echtzeit; c: Verschließen der Injektionsöffnung, Sperrung gegen austretenden Klebstoff

Die CFK-Lamelle wird von der Gegenseite in die Kammer mechanisch hineingeschoben, bis der Aluminiumträger über die gesamte Länge gefüllt ist. Die Vorschubgeschwindigkeit wird dabei so angepasst, dass ein optimaler Arbeitsdruck in der Kammer vorliegt. Bevor die CFK-Lamelle vollständig in die Kammer eingeschoben ist, tritt überschüssiger Klebstoff aus der Einschuböffnung der Kammer aus. Dies dient als Kontrollfunktion, damit die CFK-Lamelle über die gesamte Trägerlänge eingeklebt ist.

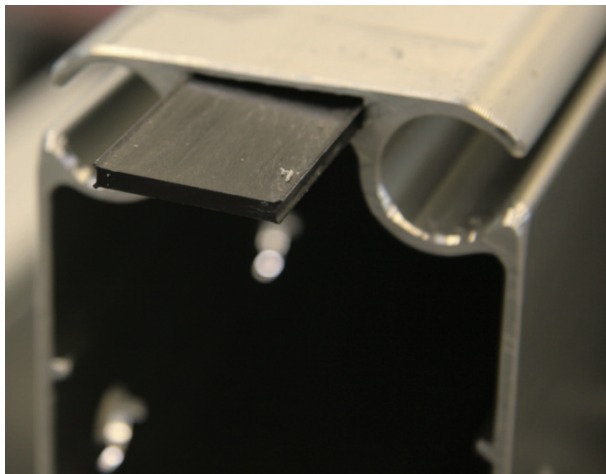


Abbildung A.104: Eingeschobene CFK-Lamelle im Aluminiumträger

Anschließend werden die Öffnungen der Kammer verschlossen und die Träger zum Aushärten des Klebstoffs liegend gelagert. Die Aushärtetemperatur beträgt dabei $20\text{ °C} \leq t \leq 25\text{ °C}$.

Nach Abschluss der Aushärtung werden die Endstücke der Alu-CFK-Hybridträger abgeschnitten, um produktionsbedingte Unstetigkeitsbereiche der Klebung zu entfernen.

Zur Absicherung des Produktionsverfahrens ist die strukturelle Klebung zwischen Aluminium und CFK in festgelegten Abständen zu prüfen.

Im Rahmen der Beurteilung des Produktionsverfahrens hinsichtlich der Qualität der Klebverbindung werden Hybridträger nach der Aushärtung in Gurtmitte über die gesamte Trägerlänge getrennt.

Die Träger zeigen in der Klebfuge keine sichtbaren Luftporen. Abbildung A.105 stellt verschiedene aufgeschnittene Verbundträger dar, die mit dem hier beschriebenen Herstellungsverfahren gefertigt wurden. Die Verklebung erfolgte auf beiden Seiten der CFK-Lamelle. Das Herstellungsverfahren wird hinsichtlich seiner Robustheit optimiert und gewährleistet eine stetige Verklebung der CFK-Lamelle im Hybridprofil.

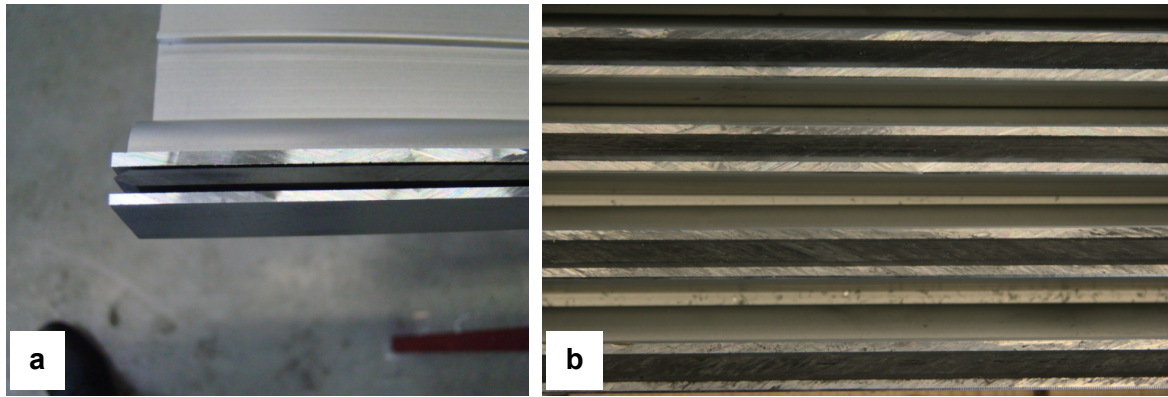


Abbildung A.105: Aufgeschnittene Verbundträger; a: vor der Verklebung mit eingelegter CFK-Lamelle; b: verschiedene Alu-CFK-Hybridträger nach der Verklebung

A.9.8 Elastische und plastische Querschnittskennwerte

Elastische Querschnittswerte $I_{y,eff}$, $M_{el,y}$, N_{el} und V_{el}

Alle Versuche an Bauteilen und die entsprechenden numerischen Analysen zeigen, dass für eine praktische Anwendung mögliche Verschiebungen zwischen den CFK-Lamellen und den Aluminiumprofilen auch bei Langzeitbeanspruchungen vernachlässigt werden können. Damit kann mit einem einfachen Modell der Dehnungsverteilung über dem Querschnitt gearbeitet werden.

Die Berechnung von $I_{y,eff}$ erfolgt mittels bezogener Materialsteifigkeiten. Als Systemsteifigkeit für die weitere Berechnung wird der E-Modul von Aluminium verwendet. Es gilt folgende bereits in Abschnitt 4.1.2 entwickelte Gleichung:

$$I_{y,eff} = I_{y,Alu} + \frac{E_{CFK}}{E_{Alu}} \times I_{y,CFK}.$$

Die elastische Grenztragfähigkeit $M_{el,y}$ wird in Abhängigkeit der verwendeten Aluminiumlegierung bestimmt mit:

$$M_{el,y} = \frac{I_{eff} \times R_{p0,2,Alu}}{h/2}. \quad (A.68)$$

Die Bestimmung der elastischen Normalkrafttragfähigkeit erfolgt über einen effektiven Querschnitt mit Dehnungsbegrenzung in der CFK-Lamelle:

$$N_{el} = R_{p0,2,Alu} \times \left(A_{Alu} + \frac{E_{CFK}}{E_{Alu}} \times A_{CFK} \right). \quad (A.69)$$

Die Anordnung von CFK-Lamellen im Aluminiumquerschnitt erfolgt in den Gurtbereichen des Alu-CFK-Hybridquerschnitts. Auf die Querkrafttragfähigkeit hat die CFK-Lamelle damit keinen Einfluss. Analog zur Bemessung von Stahltragwerken gilt:

$$V_{el} = A_{Alu,Steg} \times \frac{R_{p0,2,Alu}}{\sqrt{3}}. \quad (A.70)$$

Gebrauchstauglichkeiten müssen generell auf Basis elastischer Querschnittstragfähigkeiten bestimmt werden.

Plastische Querschnittswerte $M_{pl,y}$, N_{pl} und V_{pl}

Die plastische Grenztragfähigkeit wird definiert über eine Begrenzung der Druckspannung in den CFK-Lamellen.

Bei der Berechnung der plastischen Grenztragfähigkeit wird von einem Berechnungsmodell mit Begrenzung der CFK-Lamellenlängsspannung und ebenen Querschnitt ausgegangen. Die für die Festigkeitsermittlung relevanten Grenzdehnungen berechnen sich wie folgt:

$$\varepsilon_{u,CFK} = \frac{f_{u,CFK}^-}{E_{CFK}}, \quad (A.71)$$

$$\varepsilon_{y,Alu} = \frac{R_{p0,2,Alu}}{E_{Alu}}. \quad (A.72)$$

Für den maximalbeanspruchten Außenbereich der CFK-Lamelle gilt die Kopplungsbeziehung:

$$\varepsilon_{Alu} = \varepsilon_{u,CFK}. \quad (A.73)$$

Die Momententragfähigkeit errechnet sich aus zwei wesentlichen Anteilen. Der elastische Anteil betrifft die inneren Bereiche des Stegs des Aluminiumprofils und die CFK-Lamelle. Der plastische Anteil umfasst im Wesentlichen die Gurtbereiche des Aluminiumprofils und die äußeren Stegbereiche. Die Berechnung der plastischen Momententragfähigkeit nach dem folgenden Schema setzt einen doppelsymmetrischen Querschnitt voraus.

Die plastische Normalkrafttragfähigkeit ist die Summe aus plastischem Aluminiumanteil und Lamellenbruchkraft. Dabei wird in Normalkrafttragfähigkeiten hinsichtlich Druck und Zug unterschieden:

$$N_{Alu-CFK}^{\oplus} = R_{p0,2,Alu} \times A_{Alu} + \sum f_{u,CFK}^{\oplus} \times A_{CFK}, \quad (A.74)$$

$$N_{Alu-CFK}^{-} = R_{p0,2,Alu} \times A_{Alu} + \sum f_{u,CFK}^{-} \times A_{CFK}. \quad (A.75)$$

Die Normalkrafttragfähigkeit unter Druckbeanspruchung ist dabei generell geringer als bei Zugbeanspruchung.

Plastische Querkrafttragfähigkeit und elastische Querkrafttragfähigkeit sind äquivalent.

$$V_{pl} = V_{el} = \sum A_{Alu,Steg} \times \frac{R_{p0,2,Alu}}{\sqrt{3}}. \quad (A.76)$$

Lasteinleitung in die CFK-Lamelle

Zur Begrenzung der auftretenden Schubspannungen in der Klebfuge Aluminium – CFK ist es erforderlich, die Lasteinleitung in die CFK-Lamelle zu betrachten. Basierend auf experimentellen Untersuchungen an Klebverbindungen in Abschnitt 4.1.4 und numerischen Analysen momentbeanspruchter Trägerendbereiche in Abschnitt 4.2.1 wird die Schubspannung begrenzt auf:

$$\tau_{vorhanden} \leq \tau_{zulässig}. \quad (A.77)$$

Der als $\tau_{zulässig}$ definierte Wert der Schubspannung basiert auf den experimentellen Ergebnissen der Schubtragfähigkeiten, die aus den Scherzug- und Auszugversuchen ermittelt wurden. Grundlage für die Festlegung von Sicherheiten ist hierbei die statistische Auswertung der 5%-Fraktilwerte.

Unter Annahme eines Gleichgewichts der inneren Kräfte im Alu-CFK-Hybridträger kann folgende ingenieurmäßige Annahme getroffen werden:

$$F_{CFK-Lamelle} = \int \tau(x) \times U_{Klebung} dx. \quad (A.78)$$

Bei starrem Verbund zwischen CFK-Lamelle und Aluminiumprofil kann in momentbeanspruchten Trägerendbereichen des Alu-CFK-Hybridträgers im Bereich einer Einspannung, die mittels zweier Auflager hergestellt wird, eine lineare Zunahme des Momentes vom Aufla-

ger am Trägerende zum Auflager der maximalen Momentbeanspruchung angenommen werden. Daraus ergeben sich ein linearer Momentenverlauf und eine konstante Schubspannung im Bereich der Klebfuge. Das kann auch durch numerische Untersuchungen weitgehend bestätigt werden, jedoch nur für den Fall, dass keine nennenswerten Plastizierungen im Aluminium auftreten und dadurch die Beanspruchung in der CFK-Lamelle nichtlinear zunimmt. Für den Fall eines ebenen Querschnitts und elastischer Werkstoffreaktion im Hybridelement kann die Schubspannung in der Klebfuge zwischen Aluminium und CFK mit der in Abschnitt 4.1.2 entwickelten Gleichung ingenieurmäßig gut abgeschätzt werden:

$$\tau_{\text{Fuge}} = \left(\frac{V}{I_{\text{Hybrid, effektiv}}} z_{\text{CFK-Lamelle}} \times \frac{E_{\text{CFK}}}{E_{\text{Alu}}} \right) \times \frac{A_{\text{CFK}}}{U_{\text{Klebung}}} . \quad (\text{A.79})$$

In Bereichen, in denen das Aluminium plastiziert, nimmt die Beanspruchung innerhalb der CFK-Lamelle überproportional zu. Daraus resultieren Beanspruchungsspitzen der Schubspannung in der Klebfuge zwischen Aluminium und CFK. Diese Bereiche befinden sich jedoch außerhalb von geometrischen oder strukturellen Kerbbereichen der Klebverbindung und stellen so auch keine besonders kritisch zu bewertenden Bereiche der Klebverbindung dar. Die Schubspannung in der Verbundfuge kann dann vereinfacht berechnet werden mit:

$$\tau_{\text{Klebschicht}} = \frac{F_{\text{CFK-Lamelle}}}{L_{\text{Einbindetiefe CFK}} \times U_{\text{Klebschicht}}} , \quad (\text{A.80})$$

mit F_{CFK} Kraft innerhalb der CFK-Lamelle,

$U_{\text{Klebschicht}}$ aufgetragener Klebschichtumfang der Adhäsionsschicht Klebstoff – Alu (Umgang des Kammerquerschnitts),

$L_{\text{Einbindetiefe CFK}}$ verfügbare Länge der lastabtragenden CFK-Lamelle.

Bei einer Begrenzung der Schubspannung auf einen zulässigen Grenzwert kann eine minimale Einbindetiefe der CFK-Lamelle ermittelt werden, ab der die vollständige Tragwirkung der CFK-Lamelle aktiviert werden kann mit:

$$\text{mit: } L_{\text{Einbinde-rgrenz}} = \frac{F_{\text{CFK}}}{\tau_{\text{Grenz}} \times U_{\text{Klebschicht}}} . \quad (\text{A.81})$$

Ein wesentlicher geometrischer Kennwert zur Begrenzung der Schubspannungen in der Klebfuge stellt dabei das Verhältnis:

$$\frac{U_{\text{CFK-Lamelle}}}{A_{\text{CFK-Lamelle}}} \quad (\text{A.82})$$

dar. CFK-Lamellen mit großem Umfang, verglichen mit ihrer Querschnittsfläche, besitzen dabei Vorteile hinsichtlich des Auftretens geringerer Schubspannungen in der Klebfuge Aluminium – CFK-Lamelle, können aber andererseits zu einer Unwirtschaftlichkeit in der Anwendung führen.

Interaktionsbeziehungen zwischen Moment, Querkraft und Normalkraft

Die Momenten- und Querkrafttragfähigkeit kann im Wesentlichen untergliedert werden in:

- maximales plastisches Moment,
- maximale Querkraft,
- reduzierte Querkraft bei Interaktion mit dem plastischen Maximalmoment,
- abgemindertes plastisches Moment bei maximaler Querkraft.

Die Grenzspannung für das Aluminium wird eingeführt mit:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M}. \quad (\text{A.83})$$

Bei der Interaktion von Moment M_y und Querkraft V_z wird davon ausgegangen, dass die Querkraftbeanspruchbarkeit nur in Stegquerschnitten aktiviert wird.

Bei der Interaktion Querkraft (τ) und Normalkrafttragfähigkeit (σ_x) gilt:

$$\sqrt{\sigma_{x,\text{vorhanden}}^2 + 3\tau_{\text{vorhanden}}^2} \leq f_{yd}. \quad (\text{A.84})$$

Die ertragbare Schubspannung ist:

$$\tau_d(z) = \frac{\sqrt{3(f_{yd}^2 - (\sigma(z))_{x,\text{vorhanden}}^2)}}{3}. \quad (\text{A.85})$$

Bei einer linearen Längsspannungsverteilung aus Momentbeanspruchung im elastischen Stegquerschnitt ergibt sich:

$$\tau_d(z) = \frac{\sqrt{3\left(f_{yd}^2 - \left(\frac{f_{yd}}{h_{el}/2} \times z\right)^2\right)}}{3}, \quad (\text{A.86})$$

mit: z Position im Steg $-\frac{h_{el}}{2} \leq z \leq \frac{h_{el}}{2}$.

Die Integration über die Steghöhe z ergibt:

$$\int \tau_d(z) dz = \frac{\left| \frac{f_{yd}}{h_{el}/2} \right| \times \sqrt{3} \left(h_{el}^2 \times \sin^{-1} \left(2 \left| \frac{1}{h_{el}} \right| \times z \right) + 2 \times z \times \sqrt{h_{el}^2 - 4z^2} \right)}{6}, \quad (\text{A.87})$$

$$V_{pl,z,Mpl,y,Rd} = n_{\text{Steg}} \times s \times \int_{z=-\frac{h_{el}}{2}}^{z=+\frac{h_{el}}{2}} \tau_d(z) dz = n_{\text{Steg}} \times s \times \frac{f_{yd} \times h_{el} \times \pi \times \sqrt{3}}{12}, \quad (\text{A.88})$$

mit: n_{Steg} Anzahl der Stege, i. Allg. bei Kastenquerschnitt $n_{\text{Steg}} = 2$.

Die Querkrafttragfähigkeit $V_{pl,z,Mpl,y,Rd}$ wird erreicht ohne Abminderung der plastischen Momenttragfähigkeit $M_{pl,y,Rd}$.

Für den Fall $V_{z,Ed} > V_{pl,z,Mpl,y,Rd}$ kann die plastische Momententragfähigkeit um den Teil abgemindert werden, der für die Querkrafttragfähigkeit herangezogen wird.

Vereinfacht gilt:

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} h_{el} \times s_{Steg} \times n_{Steg} , \quad (A.89)$$

$$M_{pl,y,Vz,Rd} = M_{pl,y,Rd} - M_{el,y,Steg,Rd} = M_{pl,y,Rd} - n_{Steg} \times \frac{f_{yd} \times s_{Steg} \times h_{el}^2}{6} . \quad (A.90)$$

Es gilt:

$$V_{z,Ed} \leq V_{pl,z,Rd} . \quad (A.91)$$

Der Zusammenhang zwischen einer vorhandenen Steg auslastung $\eta \times M_{el,y,Steg,d}$,

mit η Auslastung 0...1,

$M_{el,y,Steg,Rd}$ Momententragfähigkeit des Steges,

und einer zugehörigen Querkraftbeanspruchbarkeit wird beschrieben mit:

$$\begin{aligned} V_{z,M_{pl,y}^V,Rd}^* &= n_{Steg} \times s \times \int_{z=-\frac{h_{el}}{2}}^{z=+\frac{h_{el}}{2}} \tau_d(z,\eta) dz \\ &= n_{Steg} \times s \times \frac{(\sin^{-1}(\eta) + \eta \times \sqrt{1-\eta^2}) \times |f_{yd}| \times h_{el} \times \sqrt{3}}{6 \times \eta} \end{aligned} \quad (A.92)$$

Für einen einfachen Stegquerschnitt ($s \times h_{el}$) kann die Momentbeanspruchbarkeit des Steges damit in Abhängigkeit der Querkraft beschrieben werden. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung A.106 gezeigt. Bei vollständiger elastischer Momententragfähigkeit im Steg kann dabei eine Querkrafttragfähigkeit von 78,5 % aktiviert werden. Daneben erfolgt eine Querkraft-Normalkraft-Interaktion, bei der der Stegbereich der Aluminiumprofile in Interaktion von Querkraft und Normalkraft genutzt wird. Unter Annahme einer vollständigen elastischen Spannungsauslastung infolge Momentbeanspruchung im Steg gilt:

$$V_{pl,z,Rd} = 0,785 \times A_{Steg} \times \tau_{Rd} = 0,785 \times A_{Steg} \times \frac{f_{yk}}{\sqrt{3} \times \gamma_M} , \quad (A.93)$$

$$N_{Rd} = \frac{A_{Steg}}{2} \times \frac{f_{yk}}{\gamma_M} . \quad (A.94)$$

Das Umstellen der Gleichungen ergibt:

$$2 \times N_{Rd,Steg} = V_{pl,z,Rd} \times \frac{\sqrt{3}}{0,785} . \quad (A.95)$$

Mit diesem Ansatz können Normalkraft- in Querkraftbeanspruchbarkeiten umgerechnet werden.

$$V_{pl,z,M_{pl,y},Rd} = 0,785 \times V_{pl,z,Rd} . \quad (A.96)$$

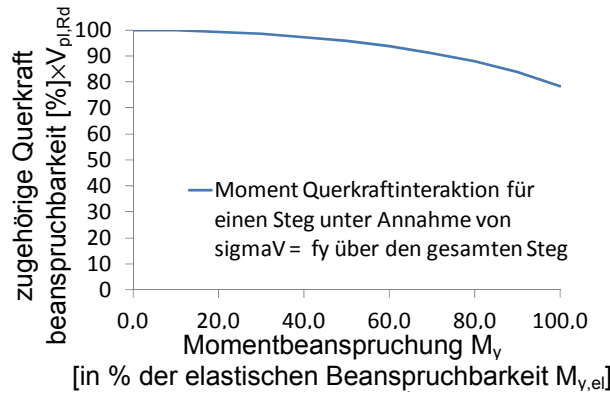


Abbildung A.106: Zusammenhang zwischen Moment und Querkraftbeanspruchbarkeit eines Steges bei elastisch-plastischer Bemessung

Für $\frac{2 \times N_{Ed}}{\sqrt{3} \times V_{pl,z,Rd}} + \frac{V_{z,Ed}}{0,785 \times V_{pl,z,Rd}} \leq 1$ kann die Momententragfähigkeit voll angesetzt werden.

Dann gilt:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1. \quad (A.97)$$

Für $\frac{2 \times N_{Ed}}{\sqrt{3} \times V_{pl,z,Rd}} + \frac{V_{z,Ed}}{0,785 \times V_{pl,z,Rd}} > 1$ ist die Momententragfähigkeit in folgender Form zu reduzieren:

$$\frac{N_1}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1. \quad (A.98)$$

Dabei gilt:

$$N_1 = N_{Ed} - \left(\left(1 - \frac{V_{z,Ed}}{0,785 \times V_{pl,z,Rd}} \right) \times \frac{\sqrt{3}}{2} V_{pl,z,Rd} \right). \quad (A.99)$$

Für eine Querkraft $V_{z,Mpl,y,Rd} \leq V_{z,Ed} \leq V_{pl,z,Rd}$ kann auf der sicheren Seite liegend die Momentbeanspruchbarkeit $M_{pl,y,Rd}^{V^*}$ durch eine lineare Interpolation zwischen $M_{pl,y,Rd}$ und $M_{pl,y,Vz,Rd}$ bestimmt werden:

$$M_{pl,y,Rd}^{V^*} = M_{pl,y,Rd} - (M_{pl,y,Rd} - M_{pl,y,Vz,Rd}) \times \frac{V_{z,Ed} - V_{z,Mpl,y,Rd}}{V_{pl,z,Rd} - V_{z,Mpl,y,Rd}}. \quad (A.100)$$

Damit kann die Momentbeanspruchbarkeit in Abhängigkeit der Querkraft- und Normalkraftbeanspruchung ausgewiesen werden.

A.9.9 Tragfähigkeitsbetrachtung mittels Monte-Carlo-Simulation

Experimentelle Untersuchungen von Material- oder Bauteileigenschaften stellen eine wesentliche Grundlage für die Bemessungsmethode der Monte-Carlo-Simulation dar. Wesentliche Kennwerte, die aus den Versuchen hervorgehen, werden statistisch ausgewertet, was die Aufstellung einer statistischen Verteilungsfunktion ermöglicht (Pasternak, et al., 2012). Die mechanischen Eigenschaften von vielen Werkstoffen werden lognormalverteilt angenommen. Die unterschiedlichen Verteilungsfunktionen sind in Abschnitt A.2 dargestellt.

In Anlehnung an DIN 1990:2010-12 (Deutsches Institut für Normung, 2010) sind versuchsmäßig bestimmte Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Versuchsanzahl gewichtet, zu bewerten.

Der Mittelwert einer lognormalverteilten Dichtefunktion wird dann bestimmt mit:

$$m_y = \frac{1}{n} \sum \ln(x_i) . \quad (\text{A.101})$$

mit: x_i Reihe der i Basisvariablen

Die Standardabweichung wird als Schätzwert bestimmt mit:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\ln(x_i) - m_y)^2} . \quad (\text{A.102})$$

Die 5 %-Fraktile werden mittels eines versuchsanzahlabhängigen Fraktilenfaktors bestimmt. In Abhängigkeit der Versuchsanzahl enthält der Fraktilenfaktor einen Anpassungsfaktor der sich auf die Standardabweichung niederschlägt.

$$X_d = \frac{\eta_d}{\gamma_m} \exp(m_y - k_n \times s_y) . \quad (\text{A.103})$$

mit: $k_n = (\text{Fraktilenfaktor } k) \times (\text{Anpassungsfaktor})$

Bei der rechnerischen Ermittlung der Standardabweichung ist dieser Anpassungsfaktor zu berücksichtigen. Der Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Versuchsanzahl bei bekanntem Variationskoeffizient ist in Tabelle A-14 dargestellt.

Versuchsanzahl n	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
Anpassungsfaktor	1,15	1,11	1,09	1,08	1,06	1,05	1,02	1,02	1,00

Tabelle A-14: Anpassungsfaktor für die Ermittlung von Fraktilewerten unter Berücksichtigung der Versuchsanzahl (Deutsches Institut für Normung, 2010)

Ermittlung der Momententragfähigkeit mittels Monte-Carlo-Simulation

Am Beispiel eines vereinfachten Alu-CFK-Hybridelementes, bestehend aus:

- Aluminiumhohlkastenprofil,
- CFK-Lamelle,
- Verbundkomponente,

wird eine zuverlässigkeitstheoretische Ermittlung der Biegetragfähigkeit mittels Monte-Carlo-Simulation gezeigt.

Die Berechnung erfolgt im Wesentlichen in sieben Stufen:

- Ermittlung der Verteilungsfunktionen für die systemrelevanten Hybridkomponenten,
 - Streckgrenze des Aluminiums,
 - Druckfestigkeit der CFK-Lamelle,
 - Schubfestigkeit der Klebverbindung,
- stochastische Erzeugung von n "Versuchswerten" für die einzelnen Hybridkomponenten,
 - Materialkennwerte für Aluminium und CFK,
 - Verbundkomponente, bezogen auf das Verhältnis zwischen vorhandenem und benötigtem Schubverbund zwischen Aluminium und CFK,
- Ermittlung der querschnittsbezogenen Widerstandsmomente,
- Kombination von querschnittsbezogenem Widerstandsmoment mit den stochastisch erzeugten Materialparametern im Hybridsystem,

- Verbundkomponente wird dabei als Störfaktor für die CFK-Lamelle angesetzt,
- Der Tragfähigkeitsanteil der CFK-Lamelle ist bestimmt durch den Minimalwert von CFK-Festigkeit und lasteinleitenden Schubverbund,
- Ermittlung der stochastischen Kennwerte: Mittelwert und Standardabweichung für das Hybridsystem,
- Bestimmung einer Verteilungsfunktion für das Hybridsystem,
- Bestimmung der Fraktilwerte für das Hybridsystem als Grundlage für eine statische Bemessung.

Zur Umsetzung der Monte-Carlo-Simulation wird das Programm Mathcad angewendet. Um die Anzahl der stochastisch verteilten Parameter innerhalb der Simulation klein zu halten werden die Steifigkeiten der Ausgangswerkstoffe Aluminium und CFK konstant angenommen. Die Steifigkeiten betragen:

$$E_{\text{Alu}} = 70.000 \text{ N/mm}^2 \quad E_{\text{CFK II}} = 160.000 \text{ N/mm}^2$$

Die Trageigenschaften der Hybridwerkstoffe sowie die Verbundeigenschaft der Werkstoffe Aluminium und CFK untereinander werden basierend auf experimentelle Versuchsdaten mit einer Verteilungsfunktion bewertet. Aus den Versuchen wurden für die Einzelkomponenten folgende Kenngrößen ermittelt:

Aluminium:

- 10 Zugversuche mit ermittelten Streckgrenzen,

$$f_y = 260,2 \quad 277,3 \quad 261,8 \quad 258,9 \quad 264,9 \quad 253,4 \quad 247,0 \quad 256,5 \quad 268,5 \quad 260,8 \left[\text{N/mm}^2 \right]$$

CFK-Lamelle:

- 10 Druckversuche mit ermittelten Bruchfestigkeiten,

$$f_u = 758,1 \quad 754,6 \quad 795,9 \quad 777,9 \quad 794,2 \quad 767,6 \quad 783,2 \quad 822,3 \quad 767,9 \quad 764,2 \left[\text{N/mm}^2 \right]$$

Klebverbindung Aluminium-CFK:

- 10 Schubfestigkeiten der Klebverbindung bei $\nu +40^\circ\text{C}$,

$$\tau_u = 8,65 \quad 7,47 \quad 8,34 \quad 8,16 \quad 8,09 \quad 8,70 \quad 8,04 \quad 7,82 \quad 7,89 \quad 8,02 \left[\text{N/mm}^2 \right]$$

Bestimmung der statistischen Kennwerte:

	Alu	CFK	Schubverbund
Mittelwert μ [N/mm ²]	260,9	778,6	8,1
Standardabweichung σ [N/mm ²]	8,3	20,9	0,37

Tabelle A-15: Statistische Kennwerte der Hybridkomponenten

Die stochastische Berechnung wird mit $n = 100.000$ Samples durchgeführt. Für die Ermittlung der Querschnittssteifigkeit ist die Einführung der Querschnittsgeometrie erforderlich. Zugunsten einer anschaulichen Berechnung wird ein einfacher Kastenquerschnitt aus Aluminium mit gurtseitig angeordneten CFK-Lamellen gewählt. Der entsprechende Alu-CFK-Hybridquerschnitt ist in Abbildung A.107 dargestellt.

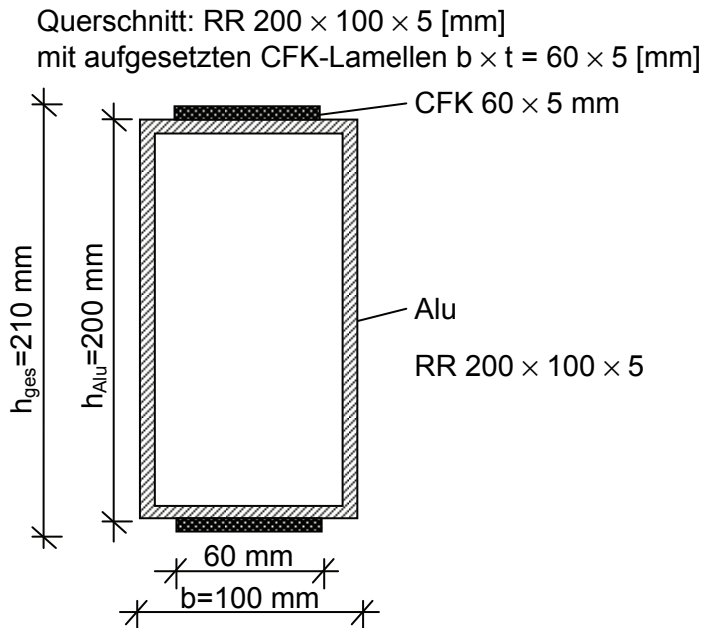


Abbildung A.107: Querschnitt des betrachteten Alu-CFK-Hybridsystems

Der Bereich des nicht plastizierenden Aluminiumstegs lässt sich berechnen mit:

$$z_{\text{el}} = \frac{\frac{h_{\text{ges}}}{2} \times \frac{f_{y,\text{Alu}}}{E_{\text{Alu}}}}{\frac{f_{u,\text{CFK}}}{E_{\text{CFK}}}} = \frac{h_{\text{ges}} \times E_{\text{CFK}} \times f_{y,\text{Alu}}}{2 \times E_{\text{Alu}} \times f_{u,\text{CFK}}}$$

Das Widerstandsmoment des Aluminiumprofils setzt sich dann aus einem elastischen und einem plastischen Anteil zusammen. Es gilt:

$$\begin{aligned} W_{\text{Alu,ges}} &= W_{\text{Alu,el}} + W_{\text{Alu,pl}} \\ &= \frac{2t_{\text{Alu}} \times (2z_{\text{el}})^2}{6} \\ &\quad + 2 \left(b_{\text{Alu}} \times \left(\frac{h_{\text{Alu}}}{2} - z_{\text{el}} \right) \times \left(\frac{h_{\text{Alu}}}{4} + \frac{z_{\text{el}}}{2} \right) - (b_{\text{Alu}} - 2t_{\text{Alu}}) \times \left(\frac{h_{\text{Alu}} - 2t_{\text{Alu}}}{2} - z_{\text{el}} \right) \times \left(\frac{h_{\text{Alu}}}{4} - \frac{t_{\text{Alu}}}{2} + \frac{z_{\text{el}}}{2} \right) \right) \end{aligned}$$

Das Widerstandsmoment des CFK-Anteils wird mit elastischem Ansatz bestimmt. Das Eigenträgheitsmoment kann dabei vernachlässigt werden. Das elastische Widerstandsmoment der CFK-Lamelle beträgt:

$$W_{\text{CFK}} = A_{\text{CFK}} \times (h_{\text{ges}} - t_{\text{CFK}})$$

Die Verbundkomponente hat einen Einfluss auf die Lasteinleitung in die CFK-Lamelle. Daher ist eine Bewertung der Verbundeigenschaften im momentbeanspruchten Trägerendbereich notwendig. Es ist abzuschätzen, welche Schubtragfähigkeit benötigt wird, um eine vollständige strukturelle Aktivierung der CFK-Lamelle nach der Lasteinleitungslänge x zu erreichen. Steht die geforderte Schubtragfähigkeit nicht zur Verfügung, so reduziert sich der in die CFK-Lamelle einzutragende Lastanteil entsprechend. Die Schubtragfähigkeit der Verbundfuge stellt somit nur einen Störfaktor dar, der bei Unterschreitung eines geforderten Mindestwertes den Tragfähigkeitsanteil der CFK-Lamelle reduziert. Wird der geforderte Wert für die

Schubtragfähigkeit erreicht, so hat die Verbundkomponente keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Hybridelementes.

Die Gesamttragfähigkeit des Hybridelementes für die Annahme eines starren Verbundes im Hybridquerschnitt berechnet sich mit:

$$M_{y, \text{Alu-CFK-Hybrid}} = W_{\text{Alu, ges}} \times f_{y, \text{Alu}} + W_{\text{CFK}} \times f_{u, \text{CFK}} \cdot$$

Die Werkstoffeigenschaften werden mit einer statistischen Verteilung, angelehnt an die Versuchsergebnisse belegt. Damit entsteht für jedes Sample ein eigenständiger Wert für die Momententragfähigkeit.

Der Verbund stellt eine Störfunktion für die Lasteinleitung in die CFK-Lamelle dar. Es ist eine ingenieurmäßige Schubspannung τ_{erf} zu definieren, die mindestens erforderlich ist, um den Schubverbund zwischen Aluminium und CFK sicherzustellen und damit die Tragfähigkeit der CFK-Lamelle zu aktivieren. Für den Fall, dass die Schubtragfähigkeit der Klebverbindung geringer ist, als für die Normalkraft der CFK-Lamelle benötigt, stellt die Schubtragfähigkeit eine Begrenzung der CFK-Lamellen-Tragwirkung dar. Ingenieurmäßige Betrachtungen zu Schubspannungen und Momentengradienten sind in Abschnitt 4.1.2 geführt. Die Verteilungsfunktion der Schubspannung wird mittels einer Skalierungsfunktion, auf die Verteilungsfunktion der Druckbeanspruchbarkeit der CFK-Lamelle bezogen, bewertet. Die Verbundfunktion definieren sich mit:

$$f_{\text{Verbundfunktion}} = \frac{\tau_{\text{vorhanden}}}{\tau_{\text{erf}}} \times f_{u, \text{CFK}} \cdot$$

Aus dieser Verbundfunktion kann eine Tragwirkung der CFK-Lamelle, bezogen auf die Lasteinleitung der Klebfuge, berechnet werden, die einen möglichen Lasteintrag in die CFK-Lamelle repräsentiert.

$$M_{\text{Verbund}} = W_{\text{CFK}} \times f_{\text{Verbundfunktion}} \cdot$$

Es wird eine Störfunktion definiert, die den Mindestwert aus CFK-Lamellen-Druckfestigkeit und Schubverbund annimmt: Der Mindestwert wird für jeden der untersuchten Samples ermittelt mit:

$$f_{u, \text{Minimum, CFK oder Verbund}} = \text{for } i \in 1 \dots n$$

$$f_{u, \text{Minimum, CFK oder Verbund}} \leftarrow \begin{cases} f_{u, \text{CFK}} & \text{if } f_{u, \text{CFK}} \leq f_{\text{Verbundfunktion}} \\ \text{else } f_{\text{Verbundfunktion}} \end{cases} \cdot$$

Die Gesamttragfähigkeit des Hybridelementes unter Berücksichtigung des Verbundes beträgt dann:

$$M_{y, \text{Alu-CFK-Hybrid, mit Verbund}} = W_{\text{Alu, ges}} \times f_{y, \text{Alu}} + W_{\text{CFK}} \times f_{u, \text{Minimum, CFK oder Verbund}} \cdot$$

Für die benötigte Schubtragfähigkeit der Verbundfuge wird in diesem Beispiel $\tau_{\text{erf}} = 6 \text{ N/mm}^2$ angesetzt. Die Schubtragfähigkeit der strukturellen Verbindung zwischen Aluminium und CFK übt damit keinen direkten Einfluss auf die Gesamttragfähigkeit des Hybridelementes aus.

Wenn die erforderliche Schubtragfähigkeit zwischen Aluminium und CFK-Lamelle um den Faktor 1,5 auf $\tau_{\text{erf}} = 9 \text{ N/mm}^2$ heraufgesetzt wird, verändert sich das Bild der Gesamttragfähigkeit, und die Schubtragfähigkeit gewinnt an Bedeutung. Schubbeanspruchungen, die die Beanspruchbarkeiten übersteigen, führen zu einer reduzierten Lastaufnahme der CFK-

Lamelle, was zu einer veränderten Verteilungsfunktion für das Hybridverbundelement führt. Die Verteilungsfunktionen von Aluminium- und CFK-Lamellentragfähigkeit bleiben dabei unverändert, ebenso die Verteilungsfunktion des Hybridelementes mit ideal angenommenem Verbund. Dann ergeben sich die in Abbildung A.108 und Abbildung A.109 dargestellten Verteilungsfunktionen.

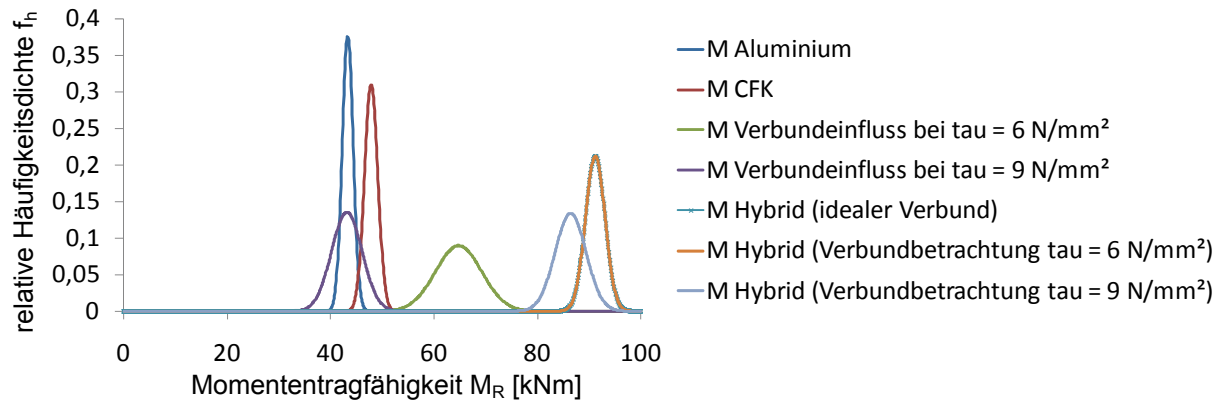


Abbildung A.108: Verteilung der Momententragfähigkeit von Aluminium und CFK sowie im Verbund mit unterschiedlichen Ansätzen

Anforderungen an die Schubtragfähigkeit $\tau_{\text{eff}} < 6 \text{ N/mm}^2$ führen bei der Ermittlung der Gesamtragfähigkeit des Hybridelementes zu Ergebnissen, die identisch mit der Verbundbetrachtung von $\tau_{\text{eff}} = 6 \text{ N/mm}^2$ sind. Die Festigkeit der Klebverbindung beeinflusst die Gesamtragfähigkeit des Hybridelementes dann nicht mehr.

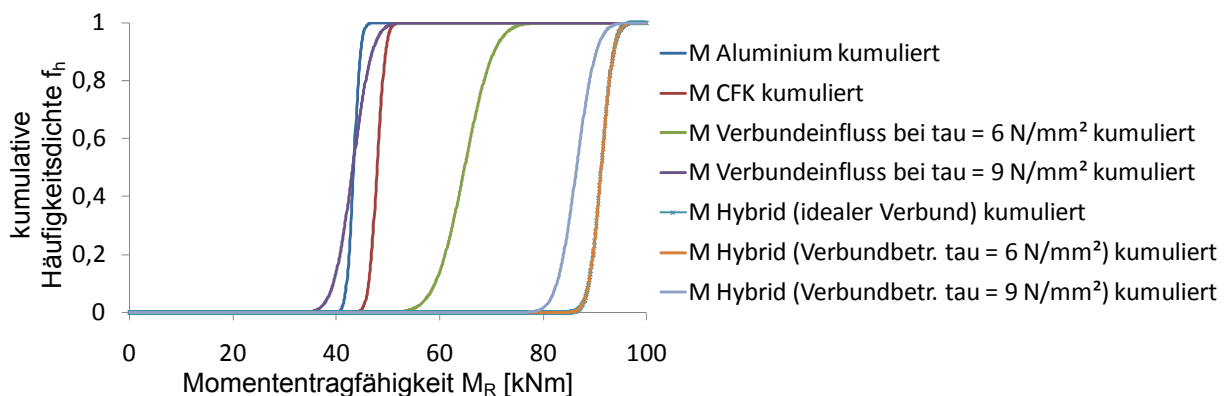


Abbildung A.109: Kumulative Verteilung der Momententragfähigkeit von Aluminium und CFK sowie im Verbund mit unterschiedlichen Ansätzen

Im Ergebnis der durchgeführten Monte-Carlo-Simulation können zwei wesentliche Feststellungen getroffen werden:

- Der Verbund zwischen Aluminium und CFK übt keinen Einfluss auf die Momententragfähigkeit des Alu-CFK-Hybridelementes aus, lediglich das Vermögen zur Lasteinleitung in die CFK-Lamelle wird begrenzt.
- Bei Überschreitung der Schubtragfähigkeit in der Verbundfuge nimmt die CFK-Lamelle den Mindestwert von Lasteinleitungs- und CFK-Lamellen-festigkeitsbestimmter Verteilungsfunktion an.

Die Begrenzung der Schubspannung in der Klebfuge erfolgt durch die Begrenzung der Querkraft V_z im Hybridelement, gleichbedeutend mit einer Begrenzung des Momentenanstiegs.

Tabelle A-16 zeigt die aus Simulationen mit jeweils 100.000 Samples ermittelten statistischen Tragfähigkeitskennwerte bei unterschiedlichen Schubspannungsanforderungen.

	Aluminium	CFK-Lamelle	Hybridelement idealer Verbund	Hybridelement $\tau_{\text{eff}}=3 \text{ N/mm}^2$	Hybridelement $\tau_{\text{eff}}=6 \text{ N/mm}$	Hybridelement $\tau_{\text{eff}}=9 \text{ N/mm}$
Normalverteilung						
Mittelwert μ	43,331	47,883	91,214	91,214	91,214	86,404
Standardabweichung	1,064	1,281	1,886	1,886	1,886	2,998
Variationskoeffizient μ	0,0246	0,0268	0,0207	0,0207	0,0207	0,0347
99,95 % Quantil	39,83	43,668	85,007	85,007	85,007	76,541
99,9 % Quantil	40,043	43,925	85,384	85,384	85,384	77,141
99,0 % Quantil	40,856	44,903	86,825	86,825	86,825	79,431
95,0 % Quantil	41,581	45,776	88,111	88,111	88,111	81,474
Lognormalverteilung						
Mittelwert μ	43,328	47,885	91,213	91,213	91,213	86,407
Standardabweichung	1,063	1,278	1,884	1,884	1,884	2,998
Variationskoeffizient μ	0,0245	0,0267	0,0207	0,0207	0,0207	0,0347
99,95 % Quantil	39,829	43,679	85,014	85,014	85,014	76,543
99,9 % Quantil	40,042	43,935	85,391	85,391	85,391	77,144
99,0 % Quantil	40,855	44,911	86,83	86,83	86,83	79,433
95,0 % Quantil	41,579	45,782	88,114	88,114	88,114	81,476

Tabelle A-16: Statistisch normal- bzw. logverteilte Auswertung der Tragsmomente M_y [kNm] aus 100.000 Monte-Carlo-Simulationen

Die Unterschiede zwischen den normalverteilt und lognormalverteilten bestimmten Quantileigenschaften sind sehr gering und für praktische Anwendungen vernachlässigbar.

Die gegenwärtig in der Normung geforderten hohen Sicherheitsfaktoren für Klebverbindungen resultieren aus verschiedenartigen Einflüssen, die auf Klebverbindungen einwirken und nur schwer zu quantifizieren sind. Dazu gehören:

- Alterungseffekte,
- Dauerbeanspruchungen und Lastwechsel,
- Krieeffekte und
- Ermüdungsbeanspruchungen.

Für eine bessere Quantifizierung der Auswirkungen dieser Effekte auf Klebverbindungen ist es erforderlich, Langzeituntersuchungen durchzuführen, die die genannten Effekte hinreichend genau abbilden können. Bei neuartigen Verbunden stehen jedoch oft nur Erfahrungswerte zur Verfügung. Daher besteht die derzeit gängige Praxis zur Berücksichtigung dieser unzureichend quantifizierbaren Effekte in einer Verschiebung des Mittelwerts der experimentell ermittelten Schubtragfähigkeit. Damit soll sichergestellt werden, dass auch Verschlechterungen der Verbundeigenschaften keine negativen Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit des zu bemessenden Systems ausüben.

A.9.10 Alu-CFK-Hybridelemente als Tragstrukturen fliegender Bauten

Bei der Entwicklung immer leichter Aluminium-Tragsysteme für temporäre Bauten ist systembedingt eine Grenze erreicht worden, die mit der alleinigen Verwendung des Werkstoffs Aluminium nicht zu überwinden ist. Der Einsatz von Kohlenstofffasern als extrem leistungsfähiges Material bietet hier die Möglichkeit, wesentlich leichtere Tragsysteme zu entwickeln. Die ausschließliche Verwendung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff (CFK) zur Herstellung montagefreundlicher Zeltsysteme war jedoch nicht zielführend, da sämtliche Montageverbindungen den Nachteil des geringen Widerstands gegen lokale Lasteinleitung in CFK-Bauteile aufzeigen. Die Verbindungsmittel müssen hier sehr aufwändig gestaltet werden und besitzen nicht die erforderliche Robustheit für die vielfache Montage und Demontage, die für ein Zeltsystem gefordert wird. Abbildung A.110 zeigt die Ausführung einer Rahmenecke für Zeltkonstruktionen in CFK-Bauweise. Eine Verbindung der Tragelemente mittels üblicher Bolzen oder Steckverbindungen ist hier nicht möglich oder nur sehr unwirtschaftlich zu realisieren. Geklebte Verbindungen, wie sie bei CFK-Konstruktionen üblich sind, würden die Demontierbarkeit der Konstruktion stark einschränken und sind daher in den Montagestößen nicht anwendbar.



Abbildung A.110: Ausführung einer Rahmenecke für eine Zeltkonstruktion in CFK-Bauweise

Um dieses Problem zu lösen und eine sehr leichte, aber dennoch gut zu demontierende Konstruktion zu entwickeln, bietet die Anwendung einer Aluminium-CFK-Hybridkonstruktion eine optimale Möglichkeit. Der Einsatz von CFK führt zu einem geringen Gewicht der Konstruktion, der Einsatz von Aluminium ermöglicht optimale Montage- / Demontage-Bedingungen, da hier herkömmliche Steck- und Bolzenverbindungen verwendet werden können.

Dazu werden bestehende Systeme adaptiert und mit CFK-Lamellen verstärkt. Die CFK-Lamellen werden dabei in den konstruktiv höchstbeanspruchten Bereichen der Konstruktion angebracht. Ein geringfügiger Anteil von CFK in der Konstruktion führt hier zu einer Gewichtsreduktion von etwa 30 % gegenüber vollständig aus Aluminium gefertigten Konstruktionen.

Die Aluminium-CFK-Hybridträger werden als Stützen und Riegel für Zeltkonstruktionen verwendet. Daraus folgt eine überwiegende Momentenbeanspruchung in den Trägern. Die Zeltkonstruktion wird aus den Hybridträgern mittels Schraub- und Steckverbindungen errichtet. Hybridträger werden grundsätzlich nicht geschweißt, und in der Konstruktion werden die

CFK-Lamellen durch Verbindungselemente nicht beschädigt. Abbildung A.111 zeigt das Tragsystem eines Aluminium-CFK-Hybridzeltes.

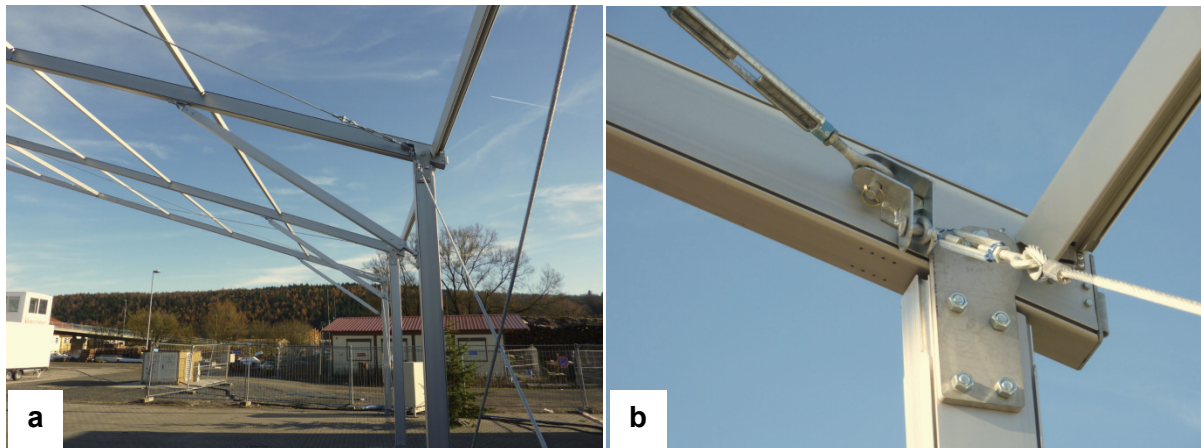


Abbildung A.111: Alu-CFK-Tragelemente eines Zeltes mit einer Spannweite $B = 30\text{ m}$;
a: Eckausbildung mit Koppelstab; b: Detailausbildung Traufanschluss

Die Dimensionierung der Tragsysteme, d.h. die Wahl von Werkstoffen, Querschnittsformen und -größen, wird bestimmt von der Anforderung, möglichst leichte Einzelbauteile zu erhalten, um Montageprozesse zu vereinfachen. Die CFK-Lamellen werden zum Schutz vor äußeren Einwirkungen im Alu-CFK-Hybridprofil angeordnet. Die geometrische Form der CFK-Lamelle ermöglicht eine definierte Klebschichtdicke, was die Voraussetzung für eine elastische Verbindung zwischen CFK-Lamelle und Aluminium mit definierten Eigenschaften darstellt. Diese Elastizität ermöglicht den Ausgleich der Temperaturdehnungsdifferenz zwischen Aluminium und CFK. Schädigungen infolge von Temperaturwechselbeanspruchungen können damit vermieden werden.

Für unterschiedliche Einsatzzwecke stehen verschiedenartige Aluminium-CFK-Hybridprofile zur Verfügung, wobei das Grundsystem der in den statischen am höchsten beanspruchten Bereichen angeordneten CFK-Lamellen mit definiert ausgebildeter Klebschicht für alle Hybridprofile zum Einsatz kommt.

A.10 CFK-verstärkte Stahlelemente

Analog zur Verstärkung von Aluminiumtragsystemen mit CFK-Lamellen können Stahl und Edelstahltragsysteme ebenfalls mittels CFK-Lamellen effektiv in ihrer Tragfähigkeit gesteigert werden. Hier können neben den Vorteilen der hohen Steifigkeit und Festigkeit der CFK-Lamellen auch der Gewichtsvorteil in Bezug auf den Dichteunterschied zwischen Stahl und CFK genutzt werden. Die Anordnung der CFK-Lamellen erfolgt in den statisch am höchsten normalkraftbeanspruchten Bereichen. Dabei können Art und Anzahl der CFK-Lamellen variiert werden, um ein möglichst effektives Tragwerk zu entwickeln. Stahltragwerke können sowohl im druckbeanspruchten als auch im zugbeanspruchten Bereich mit CFK-Lamellen nachträglich verstärkt werden. Gegenüber anderen Revitalisierungsverfahren bestehen hier Vorteile bezüglich kurzer Bauzeiten und einer für das bestehende Bauwerk schädigungsfrei realisierbaren Bauweise (kein Wärmeeintrag durch Schweißen oder Querschnittsschwächung durch Lochbilder für Bolzenverbindungen). Daneben ist die Erhöhung des Eigengewichts durch die Verstärkungsmaßnahme sehr gering. Die nachträgliche Verstärkung von Stahltragwerken mit CFK-Lamellen stellt spezifische Anforderungen an die Verbindung zwischen CFK-Lamelle und Stahltragwerk. Es sind hier insbesondere die Verbindungseigen-

schaften unter den gegebenen Randbedingungen (statisch und klimatisch) zu beachten, um eine ganzheitlich effektiv wirksame Verstärkung zu erstellen (Kessler, 2010).

A.10.1 Ausgangswerkstoffe

Unterschiedliche Stähle weisen ein stark voneinander abweichendes mechanisches Verhalten auf. Abbildung A.112 zeigt den Spannungs-Dehnungsverlauf unterschiedlicher Stahlzugproben des Werkstoffs S355. Dabei kann jede Stahllegierung unterschiedliche Materialeigenschaften aufweisen, die von vielen verschiedenen Parametern abhängig ist.

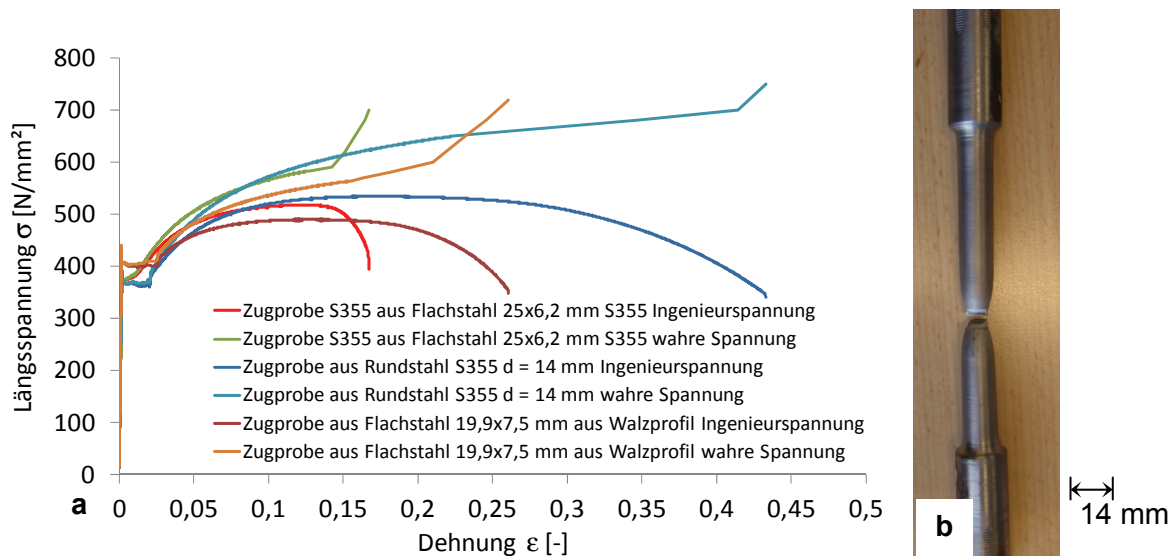


Abbildung A.112: a: Vergleich zwischen nominellen Spannungen σ_{nominell} und wahren Spannungen σ_{wahr} während eines Zugversuchs an unterschiedlichen Stahlzugproben S355; b: Zugprobe nach Bruch

Bei der Analyse des Bruchbildes aus einem Zugversuch an einer Stahlprobe (S355-J2-G3) kann im Vergleich zum Bruchbild des Aluminiums ein sehr feinkörniger Bruch festgestellt werden. Die Bruchausbildung der Stahlprobe ist von einem im Vergleich zur Aluminiumprobe wesentlich größeren Einschnürbereich gekennzeichnet, was zu einer hohen Arbeitsaufnahme während des Bruches führt. Die Bruchfläche ist von feinkörnigen Zerklüftungen gekennzeichnet, die im Vergleich zur Aluminiumprobe feiner ausgeprägt ist (siehe Abbildung A.113).



Abbildung A.113: Bruchfläche einer Stahlzugprobe S235

CFK-Lamellen können in effizienter Weise an stark beanspruchten Bereichen von Stahltragwerken angeordnet werden, um unter geringfügiger Zunahme des Eigengewichts massive

Tragkraftzuwächse zu erhalten. Im Zusammenwirken mit Stahl können die Materialeigenschaften des CFK wie:

- geringe Dichte $\rho = 1,5 \text{ g/cm}^3$,
- hoher E-Modul $E = 160.000 \dots 300.000 \text{ N/mm}^2$,
- hohe Zugfestigkeit $f_{uk}^{\oplus} = 2.400 \dots 2.800 \text{ N/mm}^2$,

optimal genutzt werden. Der hohe E-Modul der CFK-Lamellen führt dazu, dass die CFK-Lamellen auch bei elastischer Beanspruchung des Stahls große Kräfte aufnehmen und so die Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion verbessern. Für den Fall, dass der Stahl plastifiziert, können die Zugeigenschaften des Werkstoffs CFK voll ausgeschöpft werden, wodurch sich eine rechnerische gewichtsbezogene Tragfähigkeit der CFK-Lamelle gegenüber einem Stahl S355 von:

$$\frac{\text{gewichtsbezogene Tragfähigkeit CFK}}{\text{gewichtsbezogene Tragfähigkeit S355}} = \frac{\rho_{\text{S355}} \times f_{uk,CFK}^{\oplus}}{\rho_{\text{CFK}} \times f_{y,S355}} = \frac{7,8 \times 2.500}{1,5 \times 360} \approx 36$$

ergibt.

A.10.2 Mechanisches System

Die mechanische Effizienz von CFK ist gewichtsbezogen ca. 36-mal höher als von Stahl. Um diese Effizienz ausnutzen zu können, gilt es, eine Reihe notwendiger Voraussetzungen zu erfüllen. Dazu gehören:

- CFK-Lamellen sollten in hauptsächlich längskraftbeanspruchten Bereichen angeordnet werden.
- Zugkraftbeanspruchte Bereiche sollten mit CFK-Lamellen, die einen hohen E-Modul aufweisen, verstärkt werden.
- Druckkraftbeanspruchte Bereiche sollten mit niedrermoduligen CFK-Lamellen verstärkt werden, die hinsichtlich Druckfestigkeit optimiert sind.
- Die mechanische Kopplung von CFK und Stahl erfordert eine strukturelle Verklebung der Werkstoffe untereinander.

A.10.3 Anwendung

Zur Herstellung einer leistungsfähigen und strukturell wirksamen Klebverbindung zwischen Stahl und CFK stehen eine Reihe unterschiedlicher Klebstoffsysteme zur Verfügung. Es können

- 2K-Polyurethanklebstoffe und
- Epoxidharzklebstoffe (gefüllt und faserverstärkt oder ungefüllt)

verwendet werden, die hinsichtlich des gewünschten Produktionsablaufes ausgewählt werden.

Analog zu CFK-verstärkten Betontragwerken oder Alu-CFK-Hybridelementen ist eine den Belastungen standhaltende Endverankerung der CFK-Lamellen auf der Stahloberfläche zu gewährleisten. Die dort auftretenden Belastungen aus Temperaturdehnungsdifferenzen und statischer Beanspruchung des Hybridelementes stellen eine maßgebende Beanspruchung der Klebverbindung dar. Die Klebverbindung muss daher zwei wesentliche Eigenschaften vereinen:

- Gewährleistung einer strukturell wirksamen Verbindung zur Herstellung eines annähernd starren Verbundes,
- Herstellung einer elastischen Verbindung, um Schubspannungskonzentrationen zu vermeiden und auftretende Spitzenbelastungen in der Klebverbindung auf größere Bereiche aufzuteilen.

Die Bemessung von Stahl-CFK-Hybridelementen kann analog zu der Bemessung von Alu-CFK-Hybridelementen erfolgen, wobei hier zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit eine Fallunterscheidung in zugbeanspruchte und druckbeanspruchte Bereiche getroffen werden sollte.

A.11 CFK-verstärkte Betontragwerke

Bei den Möglichkeiten zur Revitalisierung von bestehenden Bauwerken oder Bauteilen können unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Für biegebeanspruchte Betontragwerke erscheint es sinnvoll, im zugbeanspruchten Bereich des Betons CFK-Lamellen längs zur Beanspruchungsrichtung anzuordnen. Damit kann die Biegebeanspruchbarkeit in definierten Grenzen erhöht werden, wobei die Druckfestigkeit des Betons schließlich maßgebend wird. Eine Anordnung der CFK-Lamellen im druckbeanspruchten Betonbereich erscheint jedoch aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll, da die hierfür notwendigen kompakten CFK-Lamellen technisch sehr aufwändig mit dem Beton verbunden werden müssen und die Kostendifferenz zwischen Beton und CFK sehr groß ist. Hier bieten sich daher eher herkömmliche Verfahren an, bei denen z. B. Aufbetonverstärkungen realisiert werden.

A.11.1 Mechanische Eigenschaften

Das mechanische Werkstoffverhalten von Beton ist geprägt von einer stark voneinander abweichenden Materialreaktion unter Druck- und Zugbeanspruchung. Der mechanische Widerstand gegenüber Zugbeanspruchungen beträgt i. Allg. nur ca. 10 % des Widerstands bei Druckbeanspruchung. Im Ergebnis ist Beton damit nur als Werkstoff geeignet, welcher Druckbeanspruchungen übertragen kann. Für Bauteile, in denen Zugbeanspruchungen auftreten, ist es erforderlich, den Betonwerkstoff in hybrider Konstruktionsweise mit hochzugfesten Werkstoffen zu verstärken. Der E-Modul von Beton ist von der Festigkeitsklasse des Materials abhängig und liegt zwischen $22.000 \text{ N/mm}^2 \leq E \leq 40.000 \text{ N/mm}^2$. Vereinfachend kann man den E-Modul von Beton berechnen nach (Grübl, et al., 2001):

$$E_{cm} = 9.500 \times \sqrt[3]{f_{cm}} \quad [\text{Angaben in N/mm}^2]. \quad (\text{A.104})$$

Die Querdehnzahl beträgt im elastischen Bereich ca. $\mu = 0,2$.

Das Materialverhalten von Beton kann unter Zugbeanspruchung als weitgehend ideal-elastisch betrachtet werden, bis mit Erreichen der Zugfestigkeit f_{ct} ein schlagartiges Versagen eintritt. Abbildung A.114 zeigt die Bruchfläche eines unbewehrten Betonbalkens nach einer Biegezugbeanspruchung.

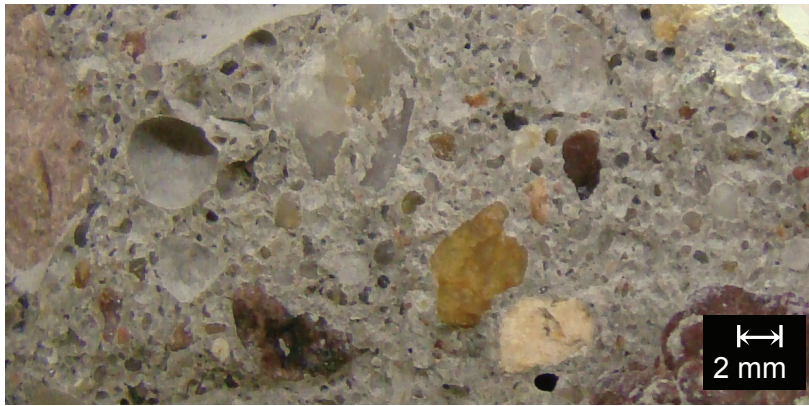


Abbildung A.114: Bruchfläche eines unbewehrten Betonbalkens B55 nach Biegezugbeanspruchung

Unter Druckbeanspruchung weist Beton ein elastisch-plastisches Materialverhalten auf. Der elastische Bereich kann dabei jedoch nicht als ideal-elastischer Spannungs-Dehnungsbereich charakterisiert werden. Das Last-Verformungs-Verhalten von Beton ist immer von einem nichtlinearen Materialverhalten gekennzeichnet, das mit zunehmender Beanspruchung an Einfluss gewinnt. Mit Erreichen der Betonfestigkeit kann ein Abknicken in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung festgestellt werden. Bei weiterer Belastung erfolgt ein ausgeprägt plastischer Entfestigungsvorgang, welcher bei einaxialer Beanspruchung von Querkzugrissen ausgelöst wird.

Unter Dauerbelastung weist Beton ein zeit- und belastungsabhängiges Kriechverhalten auf. Das Kriechverhalten ist analog zum E-Modul von der Betonfestigkeitsklasse abhängig.

Der Temperaturdehnungskoeffizient α ist ebenfalls u. a. von der Betonfestigkeitsklasse abhängig und liegt in einem Wertebereich von $6 \times 10^{-6} \times ^\circ\text{K}^{-1} < \alpha < 14 \times 10^{-6} \times ^\circ\text{K}^{-1}$.

A.11.2 Oberflächeneigenschaften

Die Eigenschaften der Betonoberfläche beeinflussen die Adhäsionseigenschaften mit Klebstoffen signifikant. Dabei gelten die in Abschnitt A.8.4 genannten notwendigen Vorbehandlungsschritte für die Betonoberfläche, ebenso bei der Verstärkung mit CFK-Lamellen. Besonders in den Anfangs- und Endbereichen der CFK-Lamellenklebung treten hohe Schubbeanspruchungen in der Klebfuge auf. Hier ist eine optimale Klebflächenvorbehandlung wesentlicher Bestandteil einer wirksamen und dauerhaften Klebverbindung zwischen Beton und CFK. Die Adhäsionseigenschaften von CFK-Lamellen können gegebenenfalls durch ein Anlösen ihrer Oberfläche mit Aceton verbessert werden. Dadurch wird die Oberfläche der CFK-Lamelle signifikant vergrößert, was zu einer Reduzierung der Adhäsionsbeanspruchungen an der CFK-Lamellen-Oberfläche führt.

A.11.3 Verbundsystem

Die Verstärkung von Betontragwerken mittels CFK-Lamellen stellt eine leistungsfähige und schnell zu realisierende Variante zur Erhöhung der Biegetragfähigkeit des Betons dar. Diese Form der Verstärkung wird häufig zur Revitalisierung bestehender Betontragwerke eingesetzt. Dabei werden CFK-Lamellen in zugbeanspruchten Bereichen der Betontragwerke angeordnet und mit einer strukturellen Klebverbindung flächig mit der Betonoberfläche verbunden. Die CFK-Lamellen werden dabei ausschließlich in zugbeanspruchten Bereichen der Betontragwerke eingesetzt.

Bei der Auslegung der CFK-Lamellenverstärkung ist besonders auf die Ausbildung der Endverankerung der CFK-Lamellen am Betonquerschnitt zu achten. Zugscherversuche von CFK-Lamellen, die auf Betonoberflächen C45 / 55 flächig mittels Epoxidharzklebstoff aufgeklebt wurden, ergaben, dass bei einer lokalen Schubspannungsüberschreitung $\tau_{\text{Beton-CFK}} > 4 \text{ N/mm}^2$ ein Zugscherversagen im Beton auftritt (Römer, 2002). Numerische Berechnungen und experimentelle Untersuchungen zum Verbund zwischen CFK-Lamelle und Beton zeigen zwei Möglichkeiten auf, die Schubspannungen in der Klebfuge zu begrenzen:

- Anordnung einer elastischen Zwischenschicht zwischen Beton und CFK,
- CFK-Lamellen, die ein günstiges Verhältnis $\frac{\text{Klebschichtbreite}}{\text{Lamellenquerschnitt}}$ aufweisen.

Abbildung A.115 zeigt eine CFK-Lamelle der Fa. Sika, die speziell für den Einsatz als Betonverstärkung hergestellt wird.

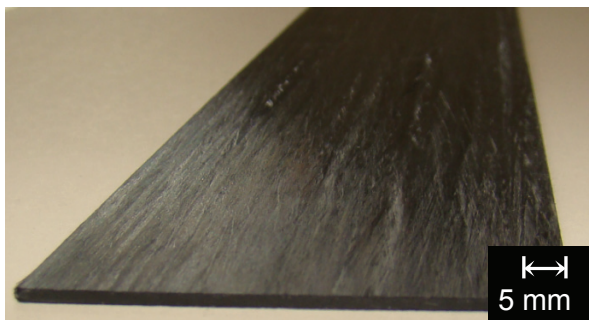


Abbildung A.115: CFK-Lamelle $b \times d = 50 \times 0,8 \text{ mm}$ für die Verstärkung von Betontragwerken

Abbildung A.116 zeigt die numerische Analyse eines Betonträgers, der mit CFK-Lamellen unterschiedlicher Dicke im Zugbereich verstärkt ist. Die Linienlast p wird dabei für jede CFK-Lamellengeometrie so angepasst, dass Normalspannung in Mitte der CFK-Lamelle von $\sigma_{\text{CFK}} = 1.000 \text{ N/mm}^2$ erreicht wird. Die Verbindung zwischen CFK-Lamelle und Beton wird in den betrachteten Modellen als starre Verbindung ohne Zwischenschicht modelliert.

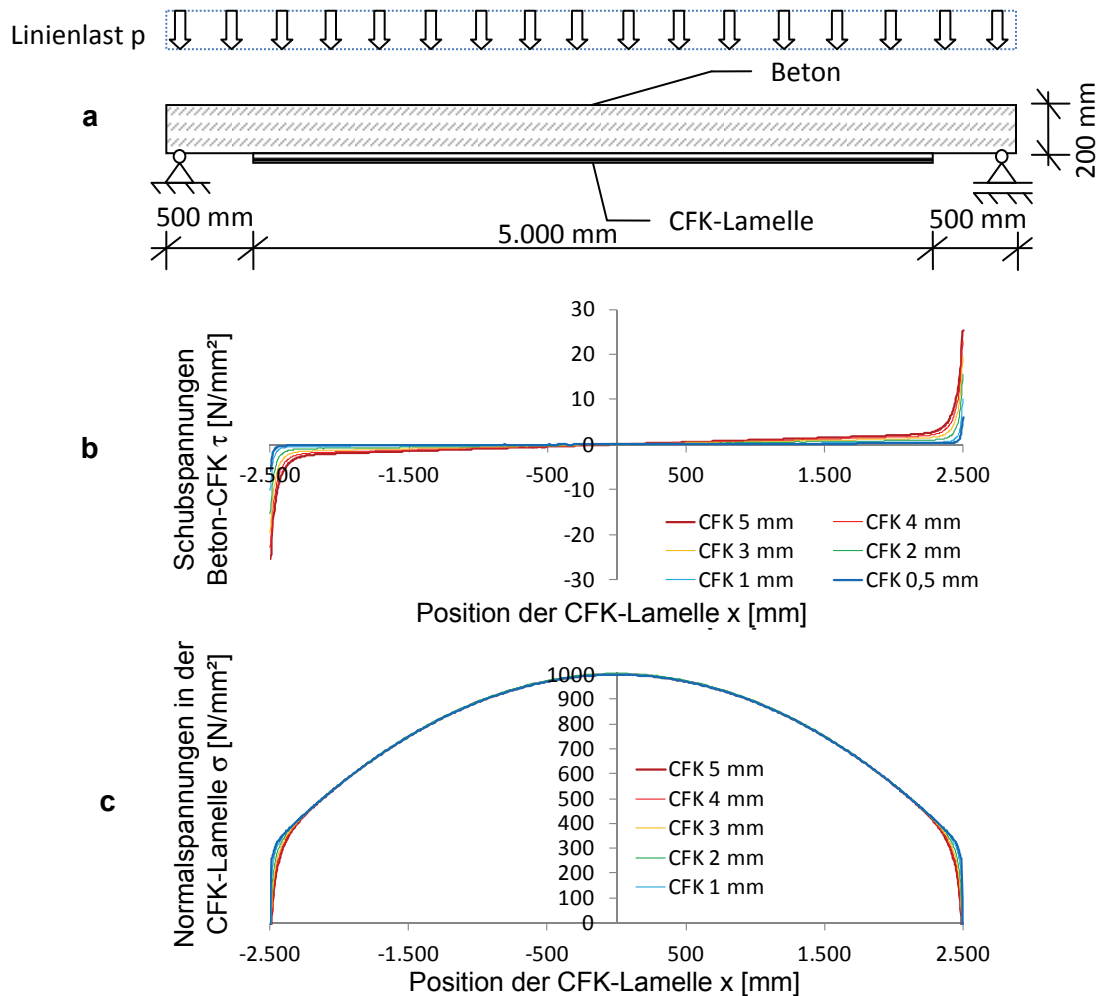


Abbildung A.116: Ergebnisse der FEM-Analyse eines CFK-Lamellen-verstärkten Betonelements; a: Beanspruchungsmodell (Linienlast p wird angepasst, damit sich eine CFK-Lamellenspannung in Feldmitte von $\sigma_{\text{CFK}} = 1.000 \text{ N/mm}^2$ einstellt b: auftretende Schubspannungen in der Klebfuge Beton – CFK; c: Normalspannungen in der CFK-Lamelle

Betrachtet man die Schubspannungen in den Endbereichen der CFK-Lamelle, so ist es erforderlich, CFK-Lamellen mit einer Dicke $t \leq 0,5 \text{ mm}$ einzusetzen, um Schubspannungen $\tau \leq 4,0 \text{ N/mm}^2$ zu erhalten. Um die Wirtschaftlichkeit dieses Verstärkungsverfahrens zu steigern und CFK-Lamellen mit Dicken bis $t = 1,0 \text{ mm}$ einsetzen zu können, ist es erforderlich, eine elastische Klebverbindung zwischen CFK-Lamelle und der Betonoberfläche anzuordnen. Damit ist es möglich, Spannungsspitzen zu reduzieren und auftretende Spitzenbelastungen auf größere Klebflächenbereiche abzuleiten.

A.11.4 Weitere Entwicklung

Die CFK-Verstärkung von Betontragwerken ermöglicht eine Revitalisierung vieler bestehender Bauwerke bei der Änderung von Nutzungsbedingungen. Besonders geeignet ist diese Verstärkungsform für Bauwerke, bei denen lange Bauzeiten große Nachteile für den Nutzer mit sich bringen. Brückenbauwerke können mit dieser Verstärkungsvariante innerhalb weniger Tage revitalisiert und so neuen Nutzungsbedingungen angepasst werden. Besondere Beachtung bei der Verstärkung von Betontragwerken mit CFK-Lamellen muss der Endverankerung der CFK-Lamellen gelten. Zur Optimierung der Endverankerung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Auswahl. So können Vertiefungen in die Betonoberfläche eingefräst

werden was in den Endbereichen der CFK-Lamelle die Herstellung größerer Klebschichtdicken ermöglicht. Bei mehrachsiger Beanspruchung können CFK-Lamellen auch mehrachsig übereinander angeordnet werden. Damit können Plattenbauwerke verstärkt werden, indem die CFK-Lamellen üblicherweise in einem Raster rechtwinklig zueinander angeordnet werden.

A.12 Abbildungs- und Tabellenverzeichnisse

ABBILDUNG A.1:	DEFINITION EINES HOOKESCHEN FESTKÖRPERS	I
ABBILDUNG A.2:	MECHANISCHES MODELL EINES NEWTONSCHEN KÖRPERS	II
ABBILDUNG A.3:	DEFINITION EINES ST-VENANT KÖRPERS	III
ABBILDUNG A.4:	LINEARELASTISCH-ISOTROPE SPANNUNGS-DEHNUNGSBEZIEHUNG	III
ABBILDUNG A.5:	BILINEAR ISOTROPE MATERIALFORMULIERUNG	VI
ABBILDUNG A.6:	MULTILINEAR KINEMATISCHE MATERIALFORMULIERUNG	VII
ABBILDUNG A.7:	KRIECHEN VON GLAS IM TEMPERATURBEREICH OBERHALB T_g	VII
ABBILDUNG A.8:	ABBAU VON SPANNUNGEN UNTER EINWIRKUNG EINER KONSTANTEN DEHNUNG	VIII
ABBILDUNG A.9:	SUPERPOSITION VON SPANNUNGSÄNDERUNGEN	VIII
ABBILDUNG A.10:	IDEAL VISKOELASTISCHES VERHALTEN EINES FESTKÖRPERS	IX
ABBILDUNG A.11:	IDEAL VISKOPLASTISCHES MATERIALVERHALTEN OHNE RÜCKKRIECHEFFEKTE	X
ABBILDUNG A.12:	KRIECKURVE EINES VISKOS-ELASTISCH-PLASTISCHEN MATERIALS	XI
ABBILDUNG A.13:	MECHANISCHES MODELL NACH MAXWELL	XI
ABBILDUNG A.14:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES VISKOELASTISCHEN FESTKÖRPERVERHALTENS	XII
ABBILDUNG A.15:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES VIELPARAMETER-VISKOELASTIZITÄTSMODELLS ..	XIII
ABBILDUNG A.16:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES BURGERS-MODELLS NACH (RUST, 2009)	XIII
ABBILDUNG A.17:	MODELLIERUNG VON EINER KLEBVERBINDUNG MIT EXPONENTIELLEM VERLAUF	XVI
ABBILDUNG A.18:	MECHANISCHES MODELL EINER KLEBVERBINDUNG MIT EXPONENTIELLER REAKTION ...	XVI
ABBILDUNG A.19:	QUERSCHNITT EINER ZUGPROBE UNTER ANNAHME VON VOLUMENKONSTANZ	XVII
ABBILDUNG A.20:	INGENIEURDEHNUNG UND WAHRE DEHNUNG	XVIII
ABBILDUNG A.21:	ITERATIVES VERFAHREN ZUR RISIKOBEURTEILUNG UND RISIKOMINIMIERUNG	XX
ABBILDUNG A.22:	BEISPIEL EINER VERTEILUNGSFUNKTION VON EINWIRKUNG UND WIDERSTAND	XXII
ABBILDUNG A.23:	KORRELATION AUS MAXIMALER TAGESWINDGESCHWINDIGKEIT	XXIV
ABBILDUNG A.24:	KLEBGERECHTE KONSTRUKTION MIT UNTERSCHIEDLICHEN QUALITÄTEN	XXIX
ABBILDUNG A.25:	AUSFÜHRUNGSVARIANTEN UND ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE	XXXI
ABBILDUNG A.26:	BETONOBERFLÄCHE C 45/55	XXXII
ABBILDUNG A.27:	OBERFLÄCHENVORBEHANDLUNG MITTELS PYROSYLVERFAHREN	XXXIII
ABBILDUNG A.28:	ALUMINIUMOBERFLÄCHE	XXXIII
ABBILDUNG A.29:	ELASTIZITÄTSMODUL UND ZUGFESTIGKEIT VON KOHLENSTOFFFASERN	XXXV
ABBILDUNG A.30:	KOHLENSTOFFFASERKURZSCHNITT- ROVINGS MIT SCHLICHTEN	XXXVI
ABBILDUNG A.31:	GLASFASERN IN UNTERSCHIEDLICHEN QUALITÄTEN	XXXVII
ABBILDUNG A.32:	EDELSTAHLFASERN IN KURZSCHNITT, $L < 5$ MM	XXXVII
ABBILDUNG A.33:	STRUKTUR EINER FLACHSFASER	XXXIX
ABBILDUNG A.34:	SPANNUNGS-DEHNUNGSBEZIEHUNG UNTERSCHIEDLICHER SPRITZGUSS-SYSTEME	XLI
ABBILDUNG A.35:	BRUCHBILDER UNTERSCHIEDLICHER FASERVERSTÄRKTER POLYPROPYLEN-PROBEN ..	XLII
ABBILDUNG A.36:	BRUCHBILD EINES GLASFASERVERSTÄRKTEN POLYPROPYLENS	XLII
ABBILDUNG A.37:	GLASFASERVERSTÄRKTES POLYPROPYLEN ALS SPRITZGUSS AUS PROBEKÖRPERN ..	XLIII
ABBILDUNG A.38:	ABLÖSUNG VON GLASFASERVERSTÄRKTEN POLYPROPYLEN	XLIII
ABBILDUNG A.39:	SCHLIFFBILD EINES GFK-STABS MIT UNIDIREKTIONALER FASERORIENTIERUNG	XLV
ABBILDUNG A.40:	FÜGEN VON ALUMINIUMPROFILIEN IM FENSTERBAU	XLVII
ABBILDUNG A.41:	HERKÖMMLICHES VERBINDUNGSSYSTEM FÜR ALUMINIUM-FASSADENELEMENTE ...	XLVIII
ABBILDUNG A.42:	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG EINER KfV-GEFÜGTEN RAHMENECKE	XLVIII
ABBILDUNG A.43:	VERGLEICH UNTERSCHIEDLICHER KLEBSTOFF- UND KfV-SYSTEME	XLIX
ABBILDUNG A.44:	UNTERSCHIEDLICHE BRUCHFORMEN UNVERSTÄRKTER UND FASERVERSTÄRKTER KfV ...	L
ABBILDUNG A.45:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES ECKVERSUCHS	LI

ABBILDUNG A.46:	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG DER ECKWINKELPRÜFUNGEN	LII
ABBILDUNG A.47:	BRUCHBILDER VON ZERSTÖREND GEPRÜFTEN FENSTERFLÜGELECKEN	LIII
ABBILDUNG A.48:	LAST-VERFORMUNGS-VERHALTEN VON FENSTERFLÜGELECKEN	LIV
ABBILDUNG A.49:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE UNTERSCHIEDLICHER ECKVERBINDERSYSTEME	LV
ABBILDUNG A.50:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE UNTERSCHIEDLICHER ECKVERBINDERSYSTEME	LVI
ABBILDUNG A.51:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE DES LAST-VERFORMUNGS-VERHALTENS	LVI
ABBILDUNG A.52:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE DER BEANSPRUCHUNG IM KfV	LVII
ABBILDUNG A.53:	BELASTUNGSUNTERSUCHUNG AN FENSTERFLÜGEL MIT GLASSCHEIBE	LVIII
ABBILDUNG A.54:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE UNTERSCHIEDLICHER FENSTERFLÜGELSYSTEME	LIX
ABBILDUNG A.55:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE UNTERSCHIEDLICHER FENSTERFLÜGELSYSTEME	LX
ABBILDUNG A.56:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES FENSTERFLÜGELS IM ECKBEREICH	LX
ABBILDUNG A.57:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE EINES FENSTERFLÜGELS IM ECKBEREICH	LXI
ABBILDUNG A.58:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE DES LAST-VERFORMUNGS-VERHALTENS	LXI
ABBILDUNG A.59:	HERSTELLUNG EINES FENSTERFLÜGELS IN LIEGENDER FERTIGUNGSWEISE	LXII
ABBILDUNG A.60:	VERSUCHSANORDNUNG FÜR DIE 4-PUNKT-BIEGEVERSUCHE	LXIV
ABBILDUNG A.61:	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	LXIV
ABBILDUNG A.62:	MITTENMOMENT UND DURCHBIEGUNG DER GETESTETEN BETONBALKEN	LXV
ABBILDUNG A.63:	VERSAGENSBILDER BALKEN 1, BEWEHRT MIT 4 Ø 6 MM	LXVI
ABBILDUNG A.64:	VERSAGENSBILDER DER KfV-BESCHICHTETEN BETONTRÄGER	LXVI
ABBILDUNG A.65:	SPANNUNGSZUSTAND IN DEN BETONTRÄGERN IM ZUGBEREICH	LXVII
ABBILDUNG A.66:	SPANNUNGEN IM KfV IM ZUGBEREICH	LXVIII
ABBILDUNG A.67:	LAST-VERFORMUNGS-KURVEN FÜR BALKEN 6	LXIX
ABBILDUNG A.68:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VOM BELASTUNGSVERSUCH AN BALKEN 6	LXIX
ABBILDUNG A.69:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VOM BELASTUNGSVERSUCH AN BALKEN 6	LXX
ABBILDUNG A.70:	PLANGEFRÄßTE BETONOBERFLÄCHE VORBEREITET FÜR DIE BESCHICHTUNG	LXXI
ABBILDUNG A.71:	ZUGPRÜFEINRICHTUNG IN KLIMAKAMMEREINHAUSUNG	LXXIV
ABBILDUNG A.72:	SCHUBTRAGFÄHIGKEIT - KURZZEITVERSUCHE PU2	LXXIV
ABBILDUNG A.73:	SCHUBTRAGFÄHIGKEIT - KURZZEITVERSUCHE PU2	LXXV
ABBILDUNG A.74:	SCHUBTRAGFÄHIGKEIT - KURZZEITVERSUCHE PU2	LXXV
ABBILDUNG A.75:	SCHUBTRAGFÄHIGKEIT NACH KLIMATISCHER BELASTUNG; KLEBSTOFF: PU2	LXXVII
ABBILDUNG A.76:	VERSUCHSANORDNUNG FÜR TRÄGERVERSUCH L = 8 M	LXXVIII
ABBILDUNG A.77:	VERSUCHSANORDNUNG FÜR TRÄGERVERSUCH L = 6 M	LXXVIII
ABBILDUNG A.78:	VERSUCHSANORDNUNG FÜR TRÄGERVERSUCH L = 4 M	LXXIX
ABBILDUNG A.79:	MOMENT-QUERKRAFTBEZIEHUNG DER ANALYSIERTEN EINFELDTRÄGER	LXXIX
ABBILDUNG A.80:	8M-TRÄGER TYP 1 IM BEREICH DER ELASTISCHEN GRENZVERFORMUNG	LXXX
ABBILDUNG A.81:	VERSUCHSSTAND MIT LASTGESCHIRR - 8M-TRÄGER TYP 1	LXXX
ABBILDUNG A.82:	BELASTUNGSVERSUCH AM ALU-CFK-HYBRIDTRÄGER TYP 2	LXXX
ABBILDUNG A.83:	AUSGEWÄHLTE DETAILS DES BELASTUNGSVERSUCHES	LXXXI
ABBILDUNG A.84:	BELASTUNGS-VERFORMUNGSDIAGRAMM 8 M BIEGEBALKEN TYP 1	LXXXII
ABBILDUNG A.85:	BELASTUNGS-VERFORMUNGSDIAGRAMM 6 M BIEGEBALKEN TYP 1	LXXXII
ABBILDUNG A.86:	BELASTUNGS-VERFORMUNGSDIAGRAMM 4 M BIEGEBALKEN TYP 1	LXXXIII
ABBILDUNG A.87:	MODELLIERUNG VON TEMPERATURABHÄNGIGEN MATERIALKENNWERTEN	LXXXIV
ABBILDUNG A.88:	TRAGVERHALTEN DES ALU-CFK-HYBRIDTRÄGERS VOM TYP 1	LXXXIV
ABBILDUNG A.89:	ERGEBNISSE DER BIEGETRÄGERPRÜFUNG VOM TYP 2	LXXXV
ABBILDUNG A.90:	A: STATISCHES SYSTEM EINES BETRACHTETEN EINFELDTRÄGERS	LXXXVI
ABBILDUNG A.91:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON SPANNUNGEN IN DER CFK-LAMELLE	LXXXVII
ABBILDUNG A.92:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE MAXIMALER SPANNUNGEN	LXXXVIII
ABBILDUNG A.93:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON SCHUBSPANNUNGEN $\tau_{\text{LÄNGS}}$	LXXXIX
ABBILDUNG A.94:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON SCHUBSPANNUNGEN $\tau_{\text{LÄNGS}}$ IN DER KLEBFUGE ..	XC
ABBILDUNG A.95:	VERHALTEN DES ALU-CFK-HYBRIDTRÄGERS	XC
ABBILDUNG A.96:	TRAGVERHALTEN DES ALU-CFK-HYBRIDTRÄGERS	XC
ABBILDUNG A.97:	BELASTUNGSMODELL FÜR DEN DAUERLASTVERSUCH	XCII
ABBILDUNG A.98:	LINIENFÖRMIG BELASTETER ALU-CFK-HYBRIDTRÄGER	XCII

ABBILDUNG A.99:	INDUKTIVER WEGAUFNEHMER UND DMS DES ALU-CFK-HYBRIDTRÄGERS	XCII
ABBILDUNG A.100:	REAKTION DES ALU-CFK-HYBRIDTRÄGERS	XCIII
ABBILDUNG A.101:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE VON SCHUBSPANNUNGEN $\tau_{\text{LÄNGS}}$	XCIII
ABBILDUNG A.102:	MISCH- UND DOSIEREINHEIT	XCIV
ABBILDUNG A.103:	INJEKTION DES KLEBSTOFFS IN DIE KAMMER	XCV
ABBILDUNG A.104:	EINGESCHOBENE CFK-LAMELLE IM ALUMINIUMTRÄGER	XCV
ABBILDUNG A.105:	AUFGESCHNITTENE VERBUNDTRÄGER	XCVI
ABBILDUNG A.106:	ZUSAMMENHANG ZWISCHEN MOMENT UND QUERKRAFTBEANSPRUCHBARKEIT	CI
ABBILDUNG A.107:	QUERSCHNITT DES BETRACHTETEN ALU-CFK-HYBRIDSYSTEMS	CIV
ABBILDUNG A.108:	VERTEILUNG DER MOMENTENTRAGFÄHIGKEIT VON ALUMINIUM UND CFK	CVI
ABBILDUNG A.109:	KUMULATIVE VERTEILUNG DER MOMENTENTRAGFÄHIGKEIT	CVI
ABBILDUNG A.110:	AUSFÜHRUNG EINER RAHMENECKE FÜR EINE ZELTKONSTRUKTION	CVIII
ABBILDUNG A.111:	ALU-CFK-TRAGELEMENTE EINES ZELTES	CIX
ABBILDUNG A.112:	A: VERGLEICH ZWISCHEN σ_{NOMINELL} UND σ_{WAHR} WÄHREND EINES ZUGVERSUCHS	CX
ABBILDUNG A.113:	BRUCHFLÄCHE EINER STAHLZUGPROBE S235	CX
ABBILDUNG A.114:	BRUCHFLÄCHE EINES UNBEWÄHRTEN BETONBALKENS B55	CXIII
ABBILDUNG A.115:	CFK-LAMELLE B X D = 50 X 0,8 MM FÜR BETONTRAGWERKE	CXIV
ABBILDUNG A.116:	ERGEBNISSE DER FEM-ANALYSE	CXV
TABELLE A-1:	STERBEHÄUFIGKEITEN PRO JAHR NACH (PROSKE, 2003; PROSKE, 2004)	XIX
TABELLE A-2:	EINTEILUNG VON SICHERHEITSKLASSEN ALS GRUNDLAGE DER BEMESSUNG	XXII
TABELLE A-3:	VERSAGENSWAHRSCHEINLICHKEITEN FÜR DEN BEZUGSZEITRAUM VON EINEM JAHR	XXII
TABELLE A-4:	EIGENSCHAFTEN VERSCHIEDENER TECHNISCHER KOHLENSTOFFFASERTYPEN	XXXV
TABELLE A-5:	EIGENSCHAFTEN VERSCHIEDENER NATURFASERN (BROUWER, 2000)	XXXIX
TABELLE A-6:	EIGENSCHAFTEN VERSCHIEDENER POLYMERER KUNSTFASERN (BROUWER, 2000)	XL
TABELLE A-7:	EXPERIMENTELL ERMITTELTE MATERIALKENNWERTE	XLI
TABELLE A-8:	UNTERSUCHTE BETONQUERSCHNITTE MIT UNTERSCHIEDLICHER BEWEHRUNGSFORM	LXIII
TABELLE A-9:	SCHUBVERSUCH AN ZWEISCHNITTIGER KLEBVERBINDUNG EN AW-6005 A T6	LXXIII
TABELLE A-10:	SCHUBVERSUCH AN ZWEISCHNITTIGER KLEBVERBINDUNG EN AW-6061 T6	LXXIII
TABELLE A-11:	STATISTISCHE AUSWERTUNG DER ERMITTELTEN SCHUBFESTIGKEITEN	LXXVI
TABELLE A-12:	STATISTISCHE AUSWERTUNG DER ERMITTELTEN SCHUBFESTIGKEITEN	LXXVI
TABELLE A-13:	STATISTISCHE AUSWERTUNG DER SCHUBTRAGFÄHIGKEIT	LXXVIII
TABELLE A-14:	ANPASSUNGSFAKTOR FÜR DIE ERMITTLUNG VON FRAKTIKWERTEN	CII
TABELLE A-15:	STATISTISCHE KENNWERTE DER HYBRIDKOMPONENTEN	CIII
TABELLE A-16:	STATISTISCH NORMAL- BZW. LOGVERTEILTE AUSWERTUNG DER TRAGMOMENTE	CVII